

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

MINISTERE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

DIRECTION DE L'ADMINISTRATION ET DU FINANCEMENT DE LA RECHERCHE

SOUS-DIRECTION DES INTERVENTIONS FINANCIERES

1, RUE DESCARTES - 75231 PARIS

RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT  
MILIEUX ET RESSOURCES

(L.P. 03 17 OCT 89)

NOTIFICATION DU 15 NOV. 1989

DECISION No 89 L 0531  
-----

LE MINISTRE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE,

VU LE DECRET No 59-1397 DU 9 DECEMBRE 1959 PORTANT CREATION D'UN  
FONDS DE DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE,

VU LE DECRET No 88-838 DU 20 JUILLET 1988 RELATIF AUX ATTRIBUTIONS  
DU MINISTRE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE,

VU LE DOCUMENT DU 1ER OCTOBRE 1973 DEFINISSANT LES CONDITIONS  
D'ATTRIBUTION DES AIDES A LA RECHERCHE,

VU LE PROGRAMME PRESENTE PAR LE BENEFICIAIRE ET L'ENGAGEMENT  
QU'IL A SOUSCRIT,

DECIDE  
-----

ARTICLE 1ER : UNE AIDE DE DEUX CENT CINQUANTE MILLE FRANCS (250.000,00 F)  
TOUTES TAXES COMPRISES DONT TVA : 39.207,00F.  
AU TAUX DE 18,6 %, EST ACCORDEE PAR L'ETAT.  
SUR LE FONDS DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

.../...

N. DECISION 89.L.0531

A : INSTITUT FRANCAIS DE  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
POUR LE DEVELOPPEMENT  
EN COOPERATION  
( ORSTOM )  
213 RUE LAFAYETTE  
75400 PARIS CEDEX 10

(001329)

- ETABLISSEMENT PUBLIC SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE
- REPRESENTE(E) PAR : SON DIRECTEUR GENERAL

ARTICLE 2 : CETTE AIDE EST ACCORDEE POUR LA REALISATION DU PROGRAMME  
----- SUIVANT :

- OBJET : SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE DANS LES SOLS TROPICAUX.

- PROGRAMME DETAILLE DES TRAVAUX SUBVENTIONNES :

A PARTIR D'UNE CONNAISSANCE APPROFONDIE DES INSTRUMENTS DE SIMULATION DES AGROSYSTEMES, LES EXPERIENCES NECESSAIRES AU SOUS-MODELE AZOTE-SOL. LA SYNTHESE PORTERA SUR L'ORGANISATION DES RECHERCHES AUTOUR DU PROCESSUS DE MODELISATION, ET SUR METHODES DE DIAGNOSTIC RAPIDE DES EVOLUTIONS DE FERTILITE.

ARTICLE 3 : CE PROGRAMME SERA REALISE PAR :

-----  
SONOS ULA ORSTOM  
APARTADO 30 IPOSTEL  
LA HECHICERA MERIDA  
- VENEZUELA

SOUS LA RESPONSABILITE DE MONSIEUR J.M. HETIER

ARTICLE 4 : LA DUREE DU PROGRAMME, A COMPTER DE LA DATE DE NOTIFICATION  
----- DE LA PRESENTE DECISION EST DE 36 MOIS.

ARTICLE 5 : LE MONTANT DE L'AIDE ACCORDEE SERA VERSE, SELON L'ECHEANCIER  
----- PREVISIONNEL FIGURANT EN ANNEXE FINANCIERE, AU COMPTE :

R.G.F.P - C/N: 39101  
CODE 1491 -

OU PAR CHEQUE SUR LE TRESOR

# SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE DANS LES SOLS TROPICAUX

(Série Barinas, llanos vénézuéliens)

Projet MRT N° 89 L 0531

J.M.HETIER, M.ZUVIA et CARDON D.

## Résumé signalétique:

Les analyses de sensibilité effectuées sur les données d'entrée ont révélé que l'adaptation des modèles existants aux conditions tropicales est impossible sans se baser sur une connaissance à la fois globale et détaillée de tout le système de simulation. Une première adaptation aux sols tropicaux devrait porter sur le calcul des limites d'eau utile. En ce qui concerne l'azote, les systèmes étudiés exagèrent le rôle de la lixiviation des nitrates ce qui provoque des simulations de stress injustifiées. La solution du sol doit continuer à jouer un rôle central à condition de faire la part entre l'ammonium mobile et fixé et d'évaluer la préférence de la plante pour l'ammonium aux dépens des nitrates. La compartimentation de l'azote organique proposée est basée sur une dispersion de l'azote liée à la biomasse microbienne suivie par l'oxydation de composés de temps de turn-over plus lent. Une programmation concertée des recherches finalisées vers la modélisation paraît indispensable pour progresser plus vite dans ces domaines.

MOTS CLEFS: MODELISATION, SOLS TROPICAUX, AZOTE ORGANIQUE, MAIS

## Avant-Propos

En tant que responsable de ce Projet, je voudrais tout d'abord remercier les responsables du Ministère qui m'ont accordé leur confiance au départ et qui ont eu la patience d'accepter le délai nécessaire à la rédaction du rapport final. Il faut qu'ils soient remerciés non seulement pour le travail accompli, mais aussi pour nous avoir permis d'aller le plus loin possible en fonction de nos possibilités. Sans cette aide, nous ne serions pas actuellement en train de compléter et de perfectionner les résultats obtenus grâce au soutien de la CEE.

Que soit aussi remerciée M.ZUVIA pour sa recherche des compartiments mesurables, ainsi que pour le travail ingrat et réalisé dans la solitude, de dépouillement de programmes souvent hermétiques. Les idées claires de D.CARDON ont aidé à la rédaction finale des parties concernant la modélisation. La qualité du travail et de la patience des techniciens vénézuéliens B.SILVA, P.URBINA, Y.ARAQUE, M.F.SEGOVIA, T.ALDANA, I.LOPEZ, J.PEREZ aidés par D.TORO est à la base des informations obtenues en partie avec le support technique de J.C.BURGAUD.

Le présent rapport se compose d'un premier texte synthétique où sont regroupés et discutés les principaux résultats et conclusions. En fonction des préoccupations du lecteur, on trouvera en annexe les tableaux et les figures susceptibles d'aider à la compréhension et à la critique du document.

## TABLE DES MATIERES

### INTRODUCTION GENERALE :

Rappel des objectifs et changements intervenus

### I PARTIE : Adaptation des modèles aux milieux tropicaux

Introduction.

Etapes de la démarche entreprise.

#### 1.1 Collecte et Production de données au Vénézuéla.

1.1.1. Révision bibliographique.

1.1.2. Production de données originales.

1.1.2.1. La culture de référence.

1.1.2.2. Les mesures de caractéristiques hydriques

#### 1.2. Essais des instruments de simulation: Analyses de sensibilité

1.2.1. L'Energie, l'eau, la plante et le sol.

1.2.2. L'azote et le sol

1.2.3. Discussion

1.2.4. Conclusion

#### Conclusions de la première partie

### II PARTIE: Contribution des réserves organiques et de l'engrais à la Solution du sol

Introduction.

1. Résultats

1.1. Lysimétrie

1.2. Suivi de la nitrification au champ

1.3. Les Incubations

1.4. Evolution de l'azote minéral de la solution du sol durant les cultures de plante test en serre.

#### Conclusion de la deuxième partie

- 1. Résultats**
- 1.1. Fractionnement granulométrique**
- 1.2. L'azote protéique**
- 1.3. L'azote dispersable et oxydable**

## **2. Discussion**

## **Conclusion de la troisième partie**

## **IV DISCUSSION**

## **V CONCLUSIONS GENERALES**

## **BIBLIOGRAPHIE GENERALE**

## **ANNEXES**

**ANNEXE I.1. : MODELISATION DU CYCLE DE L'AZOTE DANS LES AGROSYSTEMES TROPICAUX: REFLEXIONS PRELIMINAIRES**

**ANNEXE I.2. : LES CULTURES DE REFERENCE**

**ANNEXE I.3. : CARACTERISTIQUES HYDRIQUES**

**ANNEXE I.4. : ANALYSES DE SENSIBILITE: PARTIES AERIENNES**

**ANNEXE I.5. : ANALYSES DE SENSIBILITE: AZOTE DE LA PLANTE ET DU SOL**

**ANNEXE II. : EXPERIMENTATIONS SUR LA SOLUTION DU SOL**

**ANNEXE III : COMPARTIMENTATION DE L'AZOTE ORGANIQUE**

**ANNEXE IV : INSTRUMENTATION INFORMATIQUE PRODUITE**

**ANNEXE V : COMPTE RENDU DES DEPENSES**

## INTRODUCTION GENERALE :

### Rappel des objectifs et changements intervenus

L'objectif général des travaux proposés était "d'élaborer et de calibrer un sous modèle azote-sol susceptible d'être inséré dans les trois modèles choisis au terme de la première phase de la recherche." Pour parvenir à cet objectif général, il paraissait indispensable de passer par trois étapes principales:

- une analyse générale des modèles en vue de leur adaptation aux conditions tropicales,

- une réflexion sur le rôle de l'azote de la solution du sol dans le fonctionnement de ces modèles

- l'établissement des bases analytiques et expérimentales nécessaires à la définition de compartiments d'azote organique utilisables pour le calibrage et la validation d'un sous-modèle azote-sol.

### Analyse des modèles pour leur adaptation aux conditions tropicales

Pour s'approcher de l'objectif général, on a tenté de réviser soigneusement les modèles sélectionnés (CERES, NCSWAP, EPIC) pour mettre en évidence les hypothèses plus ou moins implicites qui ont servi de base à leurs auteurs lesquels ont surtout travaillé en zone tempérée. Précisons ici une fois pour toutes qu'ont été écartés à priori de cette sélection les modèles proposant une simulation empirique sans prétention à décrire le fonctionnement des systèmes sol-plante. De tels modèles peuvent être éventuellement très efficaces pour la prévision des résultats de récolte (BROADBENT, 1986) mais ils n'apportent rien à la compréhension de l'évolution des réserves organiques des sols cultivés dont la bonne gestion conditionne le maintien durable de leur fertilité (PIERI, 1989).

Cette révision a pris deux formes. Tout d'abord, celle d'une analyse critique des données nécessaires à l'utilisation des modèles et de la manière de les obtenir, puis celle d'une analyse, dite de sensibilité, qui consiste à faire varier ces données, soit en fonction de résultats expérimentaux, soit à partir des ordres de grandeur vraisemblable de variation déterminés à partir de critères pratiques ou bibliographiques.

Cette première partie n'a pas eu à souffrir de changement majeurs par rapport aux prévisions, si ce n'est sur le plan de la quantité de travail représentée par la révision de chaque modèle qui avait été sous-estimée. En effet, en arrivant au terme du contrat, seuls deux des trois modèles ont été révisés d'une manière suffisante, CERES et NCSWAP, alors que EPIC n'a fait l'objet que d'une révision partielle.

### Définition et analyse de la solution du sol.

Il paraissait ensuite indispensable de se donner les moyens de mieux comprendre le rôle de la solution du sol dont le contenu en azote est constamment alimentée par les réserves organiques du sol et par l'engrais. Pour essayer de surmonter les difficultés théoriques et pratiques liées à cet objectif spécifique, le laboratoire a participé activement pendant trois ans aux travaux et aux réunions du groupe "Solution du sol" constitué au sein de l'ORSTOM.

Il est très vite apparu que l'objectif initial devait être révisé pour au moins deux raisons. Tout d'abord, la technique des bougies poreuses qui avait été appliquée avec un succès certain au Togo sur les terres de Barre assez semblables aux alfisols des llanos occidentaux du Venezuela (SARAGONI et al.1990), s'est avéré impraticable à Barinas dont le sol présente un potentiel matriciel trop élevé pour permettre le prélèvement régulier de quantités de solution du sol suffisantes pour l'analyse.

Compte tenu des résultats obtenus en parcelle et en lysimètre, il nous a paru plus utile de nous livrer à un travail méthodologique effectué en serre pour mieux définir la solution du sol et l'utilisation de son contenu en azote par une plante test. En effet, les modèles utilisent la notion de solution du sol pour simuler la migration des nutriments (en particulier de l'azote) d'une couche de sol à l'autre en fonction des mouvements ascendants ou descendants de l'eau. Malheureusement, il n'existe pas encore de base analytique universellement acceptée pour définir la solution du sol. Les modélisateurs utilisent couramment les résultats d'extractions par le KCl en supposant qu'ils sont peu différents des quantités réellement présentes dans la solution du sol. Cette approximation est acceptable en ce qui concerne les nitrates mais ne l'est pas à priori en ce qui concerne l'ammonium. Il nous a donc paru nécessaire de revenir sur la validité des approximations utilisées par les modèles en ce qui concerne l'utilisation de l'azote nitrique et ammoniacal par les plantes.

Pour cela, les résultats d'extraction d'azote minéral au cours d'une incubation ont été comparés avec ceux de l'azote extrait du même sol par une plante

test, le Ray-Grass, souvent utilisée comme référence pour de diagnostics de fertilisation azotée.

### **Compartmentation de l'azote organique**

Sur le plan de la compartmentation de l'azote organique, un gros effort a été d'abord fait comme prévu pour tester la valeur de l'azote protéique, déterminé par hydrolyse acide, comme fraction susceptible de constituer une base analytique possible pour la définition d'un compartiment d'azote organique actif.

Compte tenu du soin apporté lors des analyses effectuées, nous pensons que les hydrolyses par HCl concentré à chaud ne constituent pas une bonne base analytique pour définir des compartiments d'azote organique utilisables en modélisation à l'échelle de temps d'une culture. Ce résultat négatif est important car les résultats obtenus au CIRAD dans de nombreuses expériences de suivi de la fertilisation azotée, laissaient à l'époque penser que cette voie de recherche était une des plus prometteuse. Des extractions plus sélectives ont ensuite été testées et ont donné des résultats mieux adaptés au but recherché, à savoir la simulation de la nutrition azotée à partir de l'engrais et des réserves d'azote organique du sol.

La phase prévue de validation sur le terrain n'a pas été encore entreprise mais elle sera menée à bien dans le cadre du projet CEE. En effet, aux résultats exposés ici, s'ajouteront ultérieurement d'autres provenant d'expériences en cours ou programmées dans le cadre du Projet CEE qui est venu depuis octobre 1991 relayer l'aide accordée par le MRT.

Pour l'instant, le présent rapport pourrait être considéré sous deux aspects principaux.

Tout d'abord une contribution à une éventuelle documentation descriptive des modèles CERES et NCSWAP et éventuellement EPIC moyennant un travail complémentaire. Une telle documentation, pour être vraiment utile à l'utilisateur éventuel, ne doit pas seulement rester au niveau des diagrammes de flux que l'on trouve généralement dans les publications, mais comporter la justification de tous les pas de calcul et donner une définition claire de toutes les variables et de tous les paramètres utilisés y compris les valeurs numériques qui trop souvent rentent mystérieuses.

Nous espérons aussi que ce puisse être une contribution à une réflexion qui nous paraît très nécessaire au niveau de la programmation des recherches à développer sur l'utilisation de la modélisation en milieu tropical.

## **I PARTIE : Adaptation des modèles aux milieux tropicaux**

### **Introduction.**

Cette démarche d'adaptation a donc commencé par une révision bibliographique des modèles comportant une description minimale du fonctionnement du sol, en particulier en ce qui concerne l'azote. Au terme de cette première étape, une étude comparative de l'architecture de six modèles sélectionnés selon ce critère a été rédigée au terme du séjour de M.ZUVIA à ORSAY dans le laboratoire du Professeur B.SAUGIER (ZUVIA 1988). Les trois modèles retenus pour une étude plus approfondie ont fait l'objet d'une publication pour rendre compte de cette réflexion préliminaire, établir des définitions et proposer un plan de travail (HETIER et al.1989). Ce texte fait l'objet de l'Annexe I du présent document. Il suffira de rappeler ici la principale conclusion de cette analyse comparative préliminaire.

**Les qualités des modèles étudiés dépendent étroitement des objectifs de leurs auteurs. Sur le plan scientifique, ces instruments de simulation semblent plus utiles pour planifier la recherche sur les systèmes sol-plante que pour faire des prévisions de récolte qui peuvent être obtenues par des instruments mathématiques plus simples et résolument empiriques.**

La conclusion du texte publié aux Cahiers de l'ORSTOM reprend les deux idées principales de la proposition faite au MRT.

"... l'utilisation de modèles existants est nécessaire afin que la mise au point de ce sous-modèle se fasse dans le contexte d'un instrument de simulation global qu'il serait illusoire et inutile de vouloir refaire de toute pièce. Mais cela suppose tout d'abord un effort d'adaptation de ces instruments, en général conçus pour fonctionner en simulant les conditions de croissance de la plante et en particulier les échanges d'azote entre le sol et la plante dans les conditions des zones tempérées."

Il fallait donc apprendre à faire fonctionner les modèles existants pour commencer à connaître "de l'extérieur" leurs réponses par rapport à des données expérimentales existantes. Nous avons donc commencé par la phase de Récollection et Production de données sur le Maïs cultivé au Vénézuéla.

Une fois familiarisés avec les données d'entrée et le fonctionnement global des modèles, il devenait possible d'en faire une lecture suffisamment détaillée pour qu'aucune phase des calculs impliqués par la simulation n'échappe à l'analyse de l'utilisateur.

Mais cette lecture se voulait à la fois critique et constructive. Son objectif est tout d'abord de déceler les hypothèses plus ou moins implicites qu'ont du faire les auteurs pour mener à bien des calculs sur la base d'approximations tirées de la littérature ou du simple bon sens. Ces approximations peuvent éventuellement être valables en zone tempérée mais ne le sont pas forcément en zone tropicale. Il s'agissait ensuite d'arriver à faire, dans la mesure du possible, des propositions nouvelles pour remplacer des choix de paramètres ou de représentations mathématiques ayant conduit à des calibrages difficiles ou à des validations impossibles en zone tropicale au moins dans le cas du sous-modèle azote-sol.

Les activités de cette seconde phase sont regroupées sous le titre **d'Analyse de sensibilité des données d'entrée et des paramètres.**

C'est alors seulement que peut commencer l'organisation d'expériences destinées à confirmer les paramètres existants, à les modifier ou à en introduire de nouveaux mieux adaptés et plus faciles à calibrer et à valider expérimentalement. Nous en donnerons certains exemples en ce qui concerne la définition de la limite inférieure de l'eau utilisable. Cependant, il est évident que ce type d'analyse et d'effort d'adaptation commencé dans le cadre du présent programme est encore insuffisant et devra être poursuivi de manière systématique dans des programmes du même genre. De tels programmes supposeraient l'existence d'une politique de recherches coordonnées en vue de parvenir à une véritable maîtrise des instruments de simulation des systèmes sol-plante. Ceci permettrait peut-être d'éviter une utilisation anarchique de modèles préfabriqués en général avec d'autres objectifs que celui que poursuivent les utilisateurs ultérieurs.

### **1.1. Récollecion et Production de données sur le Maïs cultivé au Venezuela.**

**Moyens mis en oeuvre :** Un an pour un chercheur et deux techniciens à plein temps. (M.ZUVIA, P.URBINA et J.PEREZ de septembre 89 à septembre 90)

#### **1.1.1. Récollecion bibliographique.**

Une des premières difficultés que l'on rencontre à vouloir appliquer les modèles existants aux systèmes sol-plante des régions tropicales les plus courants, est le manque de données fiables et adaptées surtout en ce qui concerne les sols, les variétés de plantes, et les conditions de culture.

Pour pouvoir choisir les points sur lesquels devrait porter en priorité l'effort expérimental, une révision des travaux effectués au Venezuela sur le maïs (en particulier un certain nombre de thèses) a été réalisée à la Faculté d'Agronomie de l'Université Centrale du Venezuela à Maracay. Il en résulte que le seul paramètre retenu par tous les travaux est la production finale de grain, paramètre important mais totalement insuffisant pour permettre de faire fonctionner les modèles. Les observations phénologiques durant la croissance sont très peu nombreuses, parfois les dates de semis ne sont même pas mentionnées, ce qui empêche d'utiliser les archives climatiques de la région quand elles existent. Malgré tout, cette révision s'est avérée utile, car elle a permis de prendre connaissance de travaux tels que celui de SALAS R.E. (1984). Ce travail, réalisé dans le même site de Barinas où nous travaillons actuellement, porte sur trois variétés de maïs, trois densités de semis et trois doses de fertilisation azotée apportée en une deux ou trois fractions. Bien qu'il ne donne pas non plus les dates de semis, on y trouve beaucoup de données utilisables en modélisation.

A ces résultats s'ajoutent ceux de MARRERO (1987) obtenus dans le cadre de l'implantation du modèle CERES au Venezuela par le FONAIAP et le groupe PAN-EARTH et ceux qui avaient été obtenus à Barinas avant l'octroi de l'aide du MRT.

Grâce à ces résultats, ont été effectués les premiers essais de simulation par le modèle CERES. La principale conclusion est que, dans le cas de ce modèle, l'influence des paramètres génétiques est prépondérante par rapport aux données climatiques et édaphiques qui influent relativement peu sur la simulation du poids de grain produit. Ces premiers essais ont été utiles pour préparer la culture de référence.

#### 1.1.2. Production de données originales.

Aucune information bibliographique n'a pu être recueillie en ce qui concerne d'autres variétés de maïs utilisées au Venezuela ni sur certains paramètres tels que la vitesse de croissance de la biomasse racinaire. De même, les renseignements de la littérature locale sur des mécanismes édaphiques tels que l'importance et le rythme de la nitrification et de la dénitrification manquent complètement.

Il a donc fallu décider sur quels points devait porter l'effort de production de données originales en tenant compte des capacités analytiques du laboratoire et des possibilités d'organisation de cultures au champ.

Malgré leur grande importance dans les bilans de l'azote, les mesures concernant la dénitrification ont été écartées faute de pouvoir trouver une collaboration locale qui puisse assumer la charge analytique que cela représente.

#### 1.1.2.1. La culture de référence.

Il a été décidé de procéder premièrement à la culture de référence indispensable pour établir le potentiel génétique de la variété de maïs dont on veut simuler la croissance. Il faut pour cela organiser les conditions de culture de manière à éliminer tout facteur limitant. Pour éviter les aléas climatiques, cette culture a été menée en saison sèche de façon à mieux contrôler les quantités d'eau apportées par irrigation. Les résultats principaux concernant le PB8 ont été valorisés par des comparaisons avec deux autres variétés locales. De plus, deux doses de fertilisation azotée ont été pratiquées pour pouvoir évaluer la translocation interne de l'azote dans la plante en particulier au moment de l'accumulation des réserves dans le grain.

Cette culture sert de point de départ à toute l'étude de sensibilité des modèles qui fait l'objet du deuxième paragraphe de la première partie du rapport. Il est donc important de bien connaître les résultats et d'en discuter la portée avant d'entreprendre la lecture de ce paragraphe.

Le compte rendu et les résultats de cette expérience ont fait l'objet d'une annexe du deuxième rapport d'avancement (mai 1991) et sont reproduits dans l'Annexe 1.4. de ce Rapport final. On ne rappellera ici que la discussion des résultats et les conclusions tirées de cette expérience.

#### Discussion des résultats et Conclusions tirées de la culture de référence.

Le premier résultat est que tout le soin apporté à l'élimination des facteurs limitant habituellement la production de matière sèche et de grain a seulement permis d'augmenter le poids de feuilles et de tiges mais est pratiquement sans effet sur la production de grains.

En effet, une comparaison avec les résultats d'une culture réalisée en 1988 en saison des pluies et dans des conditions normales a été effectuée pour aider à l'interprétation. Cette comparaison permet de constater que l'optimisation des conditions de culture n'a d'effet que sur la production des parties vertes et l'extraction totale d'azote par la plante mais pratiquement pas sur le poids de grains produit.

A partir de 100 kg.N.ha-1 on peut dire que le potentiel génétique de production de grain du PB8 est pratiquement atteint à 90%. A delà, le rendement de l'engrais devient très faible et on arrive rapidement à une consommation de luxe qui se traduit par des concentrations d'azote anormalement élevées dans les tissus verts.

Au niveau agronomique cette conclusion n'est pas originale. En ce qui concerne la modélisation des échanges sol-plante pour l'azote elle peut avoir des conséquences importantes.

En effet, dans ces conditions de fertilisation azotée optimales, le potentiel d'extraction de l'azote par les racines et de sa translocation interne qui peut différencier les caractéristiques génétiques des variétés de maïs, risque de ne pas apparaître et la qualité de la simulation des cultures ultérieures va en être affectée.

La culture de référence doit donc être organisée avec une fertilisation qui permette d'éviter les facteurs limitants mais qui permette aussi l'expression des aptitudes génétiques des variétés à valoriser au mieux les conditions de milieu et à utiliser le plus efficacement possible l'azote absorbé au profit de la production de grains.

En ce qui concerne la modélisation, il faut donc insister beaucoup sur la nécessité de perfectionner les conditions de réalisation de la culture de référence dont les résultats vont ensuite conditionner toutes les conclusions que l'on va tirer de l'utilisation ultérieure du modèle.

Les auteurs du modèle CERES ont fait un effort important pour exprimer de la manière la plus précise possible les différences génétiques entre variétés. Pour mettre à profit les perfectionnements de ce modèle par rapport aux autres instruments de simulation disponibles, il faut également que les conditions de réalisation de la culture de référence soient à la hauteur des exigences de l'instrument que l'on prétend utiliser.

#### 1.1.2.2. Les mesures de caractéristiques hydriques (Annexe I.3)

Moyens mis en oeuvre: Un technicien supérieur (J.C.BURGAUD) et un chercheur (C.MAYTIN) pendant six mois.

Nous avons fait porter l'effort sur deux déterminations prioritaires:

- la conductivité hydraulique et la capacité de rétention
- le point de flétrissement

### **La conductivité hydraulique et la capacité au champ**

La méthode du drainage interne (VACHAUD et al. 1977) basée sur l'emploi de la sonde à neutrons et de tensiomètres a été mise en oeuvre par deux fois sur le sol de Barinas et une troisième fois sur un sol ferrugineux tropical analogue à la fin de la saison sèche.

La conductivité hydraulique à saturation (environ 40% d'humidité volumique) est basse, de 10 à 1 mm par heure selon les horizons ce qui contraste avec la vitesse d'infiltration qui peut atteindre 50 mm par heure quand le sol est bien sec. Ces deux mesures expliquent pourquoi ce sol a la réputation de bon drainage mais peut provoquer des épisodes de ruissellement violents à la suite de fortes précipitations rapprochées dans le temps.

La phase de drainage lent situe la capacité de rétention entre 30% en profondeur et 20% en surface.

A la fin de la saison sèche les stocks d'eau totale sont encore de l'ordre de 300 mm sur 2m de profondeur et dépassent rarement 600 mm en saison des pluies.

### **Le point de flétrissement.**

Les mesures d'humidité au laboratoire à pF 4,2 nous ont donné des valeurs relativement élevées variant de 11 à 15 %. Comme le modèle CERES recommande de ne pas utiliser ces valeurs mais de mesurer l'humidité au moment de la dessiccation irréversible de la plante étudiée, nous avons installé une parcelle spéciale à cet effet durant la saison sèche 90 et en 91.

Le premier résultat est qu'il est très difficile d'arriver à un stress irréversible avec ce sol. Tout d'abord par ce que la plante réagit en envoyant ses racines chercher l'eau le plus profond possible. Il faut donc trouver un autre critère que la mort de la plante pour pouvoir décider du moment auquel est atteint le point de flétrissement ici appelé limite inférieure de l'eau utile. Le deuxième est qu'il est nécessaire de recalibrer le modèle CERES sur ce point car les estimations d'eau utile qu'il propose sont fausses de deux manières. Elles sont en général un peu surestimées mais, surtout, les valeurs des limites inférieures et supérieures sont situées trop bas.

La conséquence est que le modèle va simuler des stress hydriques trop tôt et va les surestimer ou les sous estimer selon la fréquence des pluies. Pour pouvoir recalibrer cette partie de CERES il faudrait voir comment interviennent les types d'argiles et d'hydroxydes amorphes dans la rétention d'eau utile afin de comprendre pourquoi les évaluations calibrées avec des sols tempérés fonctionnent mal ici.

Les mesures effectuées ont fait l'objet de deux communications orales à des congrès locaux dont le contenu pourrait être repris dans une publication originale.

## 1.2. Essais des instruments de simulation: Analyses de sensibilité

Moyens mis en oeuvre: 12 mois chercheurs (M.ZUVIA) répartis sur 1990, 1991 et 1992

L'ensemble des travaux regroupés sous le terme "Analyse de Sensibilité" fait l'objet des Annexes I.4. et I.5. En fait ce terme peut recouvrir toute une gamme d'activités à partir de grands modèles comme CERES, EPIC ou NCSWAP. La première qui nous a semblé indispensable pour prendre connaissance des modèles est d'essayer de voir quel effet produit une variation de chaque donnée considérée isolément. La marge de variation choisie est donnée par la littérature ou par l'expérience acquise au cours de la culture de référence. Cette première étape que nous avons franchie progressivement au cours de ces trois années est sans doute nécessaire mais nous sommes bien conscients qu'elle n'est pas suffisante.

Compte tenu de ces réserves, la démarche a tout de même l'avantage d'imposer à l'utilisateur novice une révision minutieuse de tout le modèle d'une manière exhaustive et le prépare à la deuxième démarche qui est celle de l'étude des interactions.

Qu'avons nous appris au cours de cette première démarche exploratoire?

Nous allons passer rapidement en revue les principaux enseignements tirés de tous les essais détaillés en annexe sans insister sur les comparaisons entre les modèles qui sont trop fonction des objectifs des auteurs et des utilisateurs pour avoir un intérêt général.

## 1.2.1. L'Énergie, la plante, l'eau et le sol.

### 1.2.1.1. Données climatiques : l'énergie et l'eau

Les données climatiques correspondent tout d'abord à l'entrée d'énergie qui va activer la photosynthèse. La radiation totale reçue est donc primordiale, mais, paradoxalement, elle est de moindre importance en climat tropical chaud puisqu'elle n'est pratiquement jamais limitante par défaut. Par contre, dans le cas du maïs il pourrait exister des zones où les températures minimales ou maximales diurnes soient trop élevées pour des variétés sélectionnées dans des climats plus froids.

### 1.2.1.2. La plante

A partir de l'énergie reçue et de l'eau disponible, la réaction de photosynthèse produit de la matière sèche selon une courbe de croissance dont la forme générale sigmoïde varie peu d'une plante à l'autre et encore moins d'une variété de maïs à l'autre. Mais, pour prétendre à un minimum de précision, il faut que le modèle puisse positionner la courbe en fonction du temps écoulé depuis le semis et donc de la somme des degrés-jour. Il est donc nécessaire de lui donner des repères les plus précis possibles. Pour CERES, ces repères sont fournis par cinq coefficients génétiques reflétant les différences varétales de maïs en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie reçue pour produire de la matière sèche ou remplir les grains. Pour les autres modèles, on se contente de donner au modèles des points de repère basés sur des mesures de surface foliaire (EPIC) ou de poids de matière sèche produite (NCSWAP) en fonction des degrés-jours accumulés depuis l'émergence.

Un premier type d'analyse de sensibilité consiste à faire varier l'énergie reçue jusqu'aux stades phénologiques successifs, pour voir l'effet de ces variations sur la production finale de matière sèche totale et de grains. Les résultats obtenus nous signalent l'importance des mesures ou observations des premiers stades du développement phénologiques. Par exemple, la mesure du laps de temps entre l'émergence et la sixième feuille du maïs a une influence non négligeable (environ 10%) sur la production finale de biomasse. L'énergie reçue pendant les phases suivantes importe apparemment moins par ce qu'elle n'est pas limitante, alors que les paramètres concernant le nombre de grains par épis et leur vitesse de remplissage sont beaucoup plus importants pour simuler correctement la production finale. Dans le cas de NCSWAP et EPIC le résultat final dépend beaucoup plus de l'éventuelle intervention des facteurs de stress.

### 1.2.1.3. L'eau et le sol

L'entrée d'eau et l'évapotranspiration constitue un autre domaine dans lequel nous avons appris qu'un effort reste à faire pour adapter les instruments actuels aux conditions tropicales. Tout d'abord l'intensité des pluies tropicales est mal prise en compte par exemple au niveau du nombre d'évènements nécessaire pour faire revenir la surface du sol à son état initial après un labour. D'autre part, la prise en compte de l'éventualité des épisodes de ruissellement superficiel est insuffisante: en effet, l'expérience nous a montré que ces épisodes seraient au moins aussi importants à considérer que la lixiviation qui peut dans bien des cas être moins importante qu'en zone tempérée en raison de l'absence d'une saison froide, humide et sans végétation.

Nous aurons à revenir sur les problèmes posés par la simulation des stress à propos de l'azote et de l'eau dans le sol. Mais il est indispensable de signaler dès à présent que la simulation des stress est certainement à reprendre avant de prétendre appliquer les modèles en milieu tropical. Sans expérience personnelle de leur validité dans les conditions tempérées, il est difficile de faire des comparaisons, et nous n'avons pas eu le temps de traiter le problème même au niveau d'une description détaillée des mécanismes de déclenchement du facteurs de stress. Tout ce que nous pouvons dire, est que la simulation fait intervenir le stress hydrique alors que les réserves en eau sont encore disponibles dans la réalité de terrain. Ceci résulte sans doute d'une sur-estimation à la fois de l'évapotranspiration et de la lixiviation. Nous avons également constaté que les limites inférieures et supérieures de l'eau utile étaient mal évaluées à partir des seules données de texture et de densité apparente.

Ces exemples suffisent pour illustrer une idée générale qui ressort de cette partie du travail appelée Analyses de sensibilité. Ces analyses sont utiles pour préparer ou accompagner la culture de référence afin de d'améliorer les méthodes de mesure et d'observation des données qui influent le plus sur le résultats final. Mais elles ne sont pas suffisantes pour préparer des propositions de modifications du modèle.

### 1.2.2. Données concernant l'azote

Paradoxalement, nous avons moins besoin de décrire dans le détail la manière dont les trois modèles ont traité le problème de l'azote, car, les auteurs eux mêmes reconnaissent que la manière de simuler le comportement de l'azote n'est pas satisfaisante. C'est d'ailleurs bien la raison pour laquelle l'objectif principal du présent travail était de construire les bases d'un nouveau système de simulation en ce qui concerne l'azote.

Les chercheurs vénézuéliens du FONAIAP avaient déjà travaillé plusieurs années avant le début du présent contrat pour implanter l'usage du modèle CERES dans le pays. Les cultures de références qu'ils ont réalisées ont vite montré que les mesures de validation basées sur l'azote minéral n'étaient pas satisfaisantes et que les simulations proposées n'avaient que peu de rapport avec les mesures d'extraction d'azote. Mais leurs recherches se sont limitées à ces constats puisqu'ils ne cherchaient pas à analyser les algorithmes utilisés.

CERES est le seul modèle que nous avons analysé dans le détail jusqu'au bout. Nous donnerons rapidement quelques exemples qui nous ont amenés à conclure qu'il n'y avait pratiquement rien à garder de la structure actuelle du sous-modèle azote. Cette conclusion rejoint celle des auteurs qui ont décidé de greffer sur CERES le module azote de NCSWAP.

Le cas de NCSWAP est un peu plus compliqué du fait que c'est un modèle en constante évolution par définition puisque c'est un modèle de recherche. C'est la raison pour laquelle nous avons provisoirement abandonné le système d'entrée de données élaboré en fin 91. Il aurait probablement été obsolète avant d'être parfaitement au point.

Une variante sans plante, NCSOIL, a été élaborée pour pouvoir être calibrée et validée en utilisant seulement des données d'incubation. C'est celle qui a fait l'objet du plus grand nombre de travaux publiés. NCSWAP utilise un schéma similaire auquel s'ajoute le prélèvement d'azote par la plante. C'est à partir de ce schéma simplifié et modifié que nous pensons maintenant pouvoir proposer un instrument qui sera calibré à l'occasion des cultures effectuées dans le cadre de l'actuel Projet CEE.

La lecture critique du modèle EPIC est restée presque au niveau de l'organigramme d'ensemble qui avait été présenté en 89.

De toute manière les options sont tellement différentes que la généralisation est impossible et les comparaisons sans intérêt. C'est pourquoi nous commenterons séparément le cas de CERES et celui de NCSWAP.

#### 1.2.2.1. Le modèle CERES

Les résidus de récolte sont considérés comme un apport d'azote sans prendre clairement en compte le temps écoulé entre leur enfouissement et le semis, ce qui est pourtant fondamental. Ils sont supposés composés d'un mélange d'hydrates de carbone de cellulose et de lignine.

Chacun des constituants est affecté d'une vitesse de décomposition dont les valeurs sont inspirées des publications sur la vitesse de décomposition des résidus végétaux en incubation. Le moteur du système est donc le carbone dont 40 % est recyclé dans les biosynthèse des décomposeurs ainsi que l'azote correspondant à un rapport C/N de 8 pour cette biomasse. L'azote éventuellement libéré par la décomposition de résidus est calculé en tenant compte de l'azote minéral préexistant. L'effet de cet apport d'azote est positif ou nul sur la culture. Il ne peut pas simuler un effet négatif alors que à la fin de la saison sèche tropicale, l'enfouissement d'une trop grande quantité d'adventice peut induire un accroissement de l'organisation brute et rendre l'azote indisponible pour la culture. C'est d'ailleurs une des raisons pour laquelle on pratique encore le brûlis.

On pourrait essayer de ne pas simuler l'effet direct des résidus sur l'alimentation azotée de la culture, et envoyer directement les produits de leur décomposition alimenter les réserves d'humus. Par contre, il serait indispensable de simuler leur effet négatif dans le cas où leur enfouissement serait trop récent pour ne pas réduire drastiquement la minéralisation nette. A coté de cela, le modèle propose de tenir compte de la profondeur d'enfouissement des résidus et de la quantité de racines résiduelles mais les variations de ces données n'entraînent pratiquement aucun effet sur les sorties de matière sèche et de grain.

La minéralisation des réserves d'humus du sol peut constituer un apport essentiel dans le cas de fertilisation faible ou nulles et dans ce cas la précision de la mesure des stocks de matière organique du sol est un facteur d'erreur important dans la simulation.

Le cas de l'effet du pH est intéressant dans la mesure où il illustre bien ce qui peut arriver si l'auteur simule un mécanisme sans grande importance en lui même mais qui va introduire une erreur de première grandeur à cause d'une interaction imprévue. En effet, la baisse du pH va freiner la nitrification ce qui à son tour diminue la lixiviation de l'azote vers les couches inférieures qui sont supposés ne pas être atteintes par les racines. En conséquence, plus le pH simulé est bas, moins on simule de perte d'azote et plus la récolte simulée augmente!

Par ailleurs, une estimation exagérée de la nitrification et de la lixiviation des nitrates va déclencher des stress sans aucun rapport avec la réalité alors que la fertilisation azotée est surabondante et que les teneurs d'azote dans les tissus sont tout à fait normaux. Ces déséquilibres fondamentaux caractérisant l'instrument de simulation proposé par CERES, sont beaucoup plus importants que le fractionnement des apports

de fertilisant ou l'effet de l'hydrolyse de l'urée que l'on peut également simuler, mais sans aucun effet sur le résultat final.

En conclusion, les analyses de sensibilité effectuées nous amènent à penser que la proposition de CERES est caractérisée par un déséquilibre de la simulation entre des facteurs qui ne sont pas hiérarchisés. Si on veut suivre une logique mécaniste qui prétende être plus ou moins exhaustive, il faudrait pondérer l'influence des facteurs quand ils ne sont pas limitants. Un autre type d'analyse de sensibilité pourrait alors consister à détecter les effets pervers et permettre l'étude des garde fous qui empêcheraient leur déclenchement intempestif.

#### 1.2.2.2. Le modèle NCSWAP

Les problèmes posés par le modèle NCSWAP sont d'une autre nature. Tout d'abord par ce que le modèle est plus dirigé vers la simulation de l'évolution des constituants organiques du sol que celle de la croissance d'une plante. Deuxièmement comme nous l'avons déjà signalé, c'est un modèle en constante évolution puisqu'il constitue plus un stimulant à la recherche et un support à la pédagogie qu'un instrument opérationnel de prévision de récolte ou d'évolution des sols.

C'est ainsi que l'on y trouve tout d'abord un éventail complet des possibilités d'entrée organiques dans le système comprenant jusqu'à 15 types de résidus végétaux chacun d'entre eux comprenant une partie labile et une partie récalcitrante à la dégradation biologique. D'emblée, on comprend qu'une telle complexité ne va pas se prêter à des expériences de calibrage et de validation faciles et précises.

La situation n'est guère plus simple dans le cas de l'humus subdivisé en deux ensemble et quatre sous ensembles de transformation et un compartiment puit, inerte à l'échelle de temps des simulations. Un des avantages du système de simulation proposé, est qu'il prévoit l'éventualité des principaux processus et même de l'utilisation des traceurs isotopiques du carbone et de l'azote pour faire des mesures de calibrage. Les équilibres entre organisation et minéralisation d'une part, nitrification et dénitrification d'autre part contrôlent les quantités d'azote disponibles pour la plante. Celle-ci intervient directement à travers de la rhizodéposition et indirectement en récupérant l'azote de la minéralisation nette.

Les simulations réalisées avec NCSWAP présentent un stress d'azote permanent alors que la fertilisation est surabondante (270 kg.ha.-1) probablement pour les mêmes raisons que dans le cas de CERES, c'est à dire surestimation de la nitrification et de la lixiviation. Dans ces conditions, faire varier les autres données d'entrée n'aurait pas beaucoup d'intérêt si on ne change pas les sorties à observer pour les analyses de sensibilité.

Refaire à propos de NCSWAP le même type d'analyse systématique réalisées avec CERES nous a paru de un exercice inutile pour plusieurs raisons.

Tout d'abord elles n'auraient pas pu être terminées dans le temps imparti. Deuxièmement l'expérience acquise à propos de CERES nous a montré les limites de l'exercice qui est utile mais insuffisant pour bâtir des propositions nouvelles. Troisièmement tout le travail effectué sur la compartimentation de l'azote vise justement à trouver des alternatives à la proposition de NCSWAP qui ne se prête guère qu'à des mesures d'azote minéral et de biomasse qui ne nous paraissent pas satisfaisantes. Enfin, c'est justement à partir du schéma de NCSWAP que nous sommes en train de travailler pour élaborer un module azote simplifié qui sera calibré en 93 et validé en 94.

### 1.2.3. Discussion

Pour adapter les modèles il faut d'abord les connaître, et cette prise de connaissance suppose beaucoup de temps. La méthode de lecture influe évidemment beaucoup sur le temps donc seules des personnes expérimentées peuvent travailler rapidement. Nous avons effectué une lecture qui a abouti à essayer successivement de faire varier les données du modèle CERES concernant la plante et l'azote pour constater l'effet produit sur la production finale de matière sèche et de grains. Un travail analogue a été effectué par une équipe de l'INRA entre 1977 et 1990 pour étudier les conditions d'applications du modèle CERES Maïs dans la plaine d'Alsace (PLANTUREUX et al 1991). Il a conduit ses auteurs à faire un recalibrage des paramètres génétiques pour pouvoir obtenir des résultats satisfaisants. Tel n'était pas notre objectif puisque le modèle ne devait que servir de cadre à l'évaluation des modifications proposées au module azote.

Mais le simple énoncé des constatations tirées de la lecture détaillée des modèles, nous montre que des propositions sérieuses de modification concernant diverses parties de ces modèles sol-plante correspondrait à des années de travail pour une équipe pluridisciplinaire dotée de bons moyens en personnel technique et de laboratoires bien équipé. Pour tout ce qui ne concerne pas directement l'azote nous ne

pouvons qu'indiquer des pistes de travail et éventuellement un ordre d'urgence dans les travaux à entreprendre.

En effet, l'idée de départ était qu'il suffirait de "geler" toutes les parties du modèle qui ne concernaient pas l'azote pour pouvoir évaluer les modifications proposées au niveau de d'un sous-modèle azote. Cette vision s'avère trop simpliste et théorique car elle ne tient pas assez compte des interactions eau-azote et plante-azote. Il est indispensable de bien comprendre les transferts d'eau pour savoir si réellement l'azote a pu quitter la zone d'exploration des racines. Il est également indispensable de mieux comprendre comment la concentration critique d'azote dans la plante déclenche les simulations des stress d'azote. Ces deux derniers exemples nous confirment que l'on ne peut donc pas faire l'économie d'une connaissance à la fois globale et détaillée du modèle pour pouvoir proposer des modifications même sur un seul point.

Les résultats exposés dans ce rapport correspondent à une démarche exploratoire qui était sans doute inévitable compte tenu des conditions de mise en place de ce programme, mais qui est insuffisante pour aboutir à des propositions opérationnelles.

En effet, cette démarche présente au moins deux défauts principaux surtout lorsque l'on se limite à utiliser la production de matière sèche et de grains comme donnée de sortie. Tout d'abord, elle va tendre à minimiser l'importance de toutes les données qui, dans un certain contexte, ne correspondent pas à un facteur limitant pour la culture simulée. De plus, elle tend à estomper l'effet des interactions qui peuvent, soit compenser, soit exagérer, l'influence apparente d'un facteur sur la production de matière sèche et de grain.

Actuellement, nous avons entrepris le programme suivant selon une démarche plus constructive qui vise à maîtriser l'ensemble de la structure pour comprendre suffisamment les interactions qui peuvent survenir au moment de mettre en application le nouveau module azote à greffer sur le modèle.

#### **1.2.4. Conclusion**

L'adaptation aux conditions tropicales devrait commencer par une meilleure simulation de l'effet de températures excessives et de pluies intenses. Une intersaison chaude et sèche au lieu d'un hiver froid et humide est une autre différence fondamentale vis à vis de la percolation de l'eau et de l'azote minéral. Le comportement des réserves d'eau disponible est à réviser en prenant en compte des conditions minéralogiques et structurales des sols tropicaux.

Les déterminations traditionnelles d'eau disponible sur les quelles se base le calibrage du modèle CERES conduisent à des estimations de l'eau utile qui ne sont pas tellement erronées en valeur absolues mais qui situent mal les limites inférieures et supérieures de l'eau disponible.

Les cultures de référence des plantes à étudier sont systématiquement à refaire plusieurs fois avant de prétendre utiliser les modèles. C'est à ce propos que les analyses de sensibilités se sont révélées les plus utiles pour hiérarchiser les facteurs et optimiser les mesures les plus importantes.

En effet si on décide de faire appel à un grand nombre de facteurs pour organiser la simulation, il faudrait également les hiérarchiser quand ils ne sont pas limitants et leur assigner une marge de variation acceptable.

La meilleure documentation qui est celle de CERES, ne dispense pas de la lecture détaillée du programme. Quand la documentation est limitée à quelques articles comme dans le cas de NCSWAP, cette lecture devient un exercice réellement difficile et qui prend beaucoup de temps. Une fois reconstituée la démarche des auteurs et la liste de toutes les hypothèses auxquelles ils ont du faire appel plus ou moins implicitement, il reste encore beaucoup à faire.

## CONCLUSIONS DE LA PREMIERE PARTIE

Le travail d'adaptation aux conditions tropicales ne saurait être mené comme de simples retouches à apporter aux systèmes existants. C'est un travail pluridisciplinaire qui pour aboutir de manière rapide et satisfaisante devrait être planifié sous forme de répartition des tâches entre plusieurs équipes bien outillées travaillant dans des situations tropicales bien choisies.

Nous avons relevé quelques unes de ces tâches sans prétendre que ce relevé soit définitif. Elles concernent l'effet des températures élevées et des pluies violentes, la détermination des limites inférieures d'eau utile et la manière de déclencher les stress hydriques et azotés. Les cultures de référence doivent être refaites à plusieurs reprises et en plusieurs lieux avant de pouvoir considérer le calibrage d'une variété donnée comme définitif.

La lecture de CERES et NCSWAP nous apprend que les pires erreurs viennent d'une mauvaise estimation des équilibres organisation-minéralisation brutes, nitrification- dénitrification, qui peuvent induire une surestimation de la lixiviation des nitrates et à une sous-estimation de la dénitrification.

Seuls l'établissement préalable de bilans d'azote permettra d'échapper à ces travers. Nous avons vu au cours des travaux préalables ou parallèles au présent contrat que ces bilans en conditions tropicales nous montrent au contraire peu de lixiviation et beaucoup de pertes probablement dues à la dénitrification.

Ces bilans pourraient avantageusement être établis à l'occasion des cultures de référence qui devraient donc être systématiquement marquées. Elles serviront tout d'abord à établir les coefficients génétiques que demande CERES dans le cas du maïs, tout en fournissant aussi les données nécessaires au fonctionnement d'autres modèles tels que NCSWAP ou EPIC. Grâce au marquage, il est possible non seulement de faire des bilans d'azote pour évaluer les pertes, mais on peut faire des prélèvements de sol pour évaluer l'organisation de l'engrais et la minéralisation des réserves du sol au cours de la culture.

Ces évaluations de l'organisation doivent se faire à l'aide de fractionnements simples rapides et reproductibles que nous proposons par ailleurs sur la base des essais effectués. Nous proposons de limiter le nombre des compartiments en fonction des mesures réalisées sur les fractions. L'évaluation de la minéralisation nette de l'azote sera basée sur les prélèvements des plantes y compris les adventices pendant et après la culture car elles ont un rôle beaucoup plus important qu'en zone tempérée.

Pour être rationnel, le travail d'adaptation des modèles doit être mené en gardant l'équilibre entre la vision d'ensemble et le souci du détail. Ce double souci pourrait être résumé par une formule évoquant les "grandeurs et servitudes des métiers de la modélisation" qui demandent en effet beaucoup de patience et de minutie pour des résultats qui se font longtemps attendre avant d'être vraiment satisfaisants.

## II PARTIE : Contribution des réserves organiques et de l'engrais à la Solution du sol

### Introduction

Les constructeurs de modèles, en simulant les relations des plantes cultivées avec les sols ont réactivé les recherches sur la solution du sol. En effet, tous font appel à des hypothèses plus ou moins explicites sur sa composition afin de simuler le transfert des solutés avec celui de l'eau. Tous les modèles font passer constamment l'eau d'une couche à l'autre du sol en fonction des précipitations, de la conductivité hydraulique, et de l'évapotranspiration. En ce qui concerne le contenu de la solution en composés azotés, leurs hypothèses reposent sur des résultats existants qui ne sont pas nécessairement adaptés au problème posé par les rapports entre la solution du sol et la plante. Or ce problème est fondamental pour la simulation des rapports sol-plante.

En effet, les modèles tels que CERES, NCSWAP ou EPIC sont des instruments de simulation qui font appel à des descriptions dynamique du fonctionnement des systèmes de relation entre le sol, la solution et la plante (HETIER et al. 1989). Leur calibrage et validation se basent obligatoirement sur des mesures de flux de nutriments qui traversent la solution pour alimenter la plante.

En ce qui concerne l'azote, les auteurs considèrent que la solution transporte automatiquement l'azote nitrique et ammoniacal. Certains prévoient dans le cas de l'ammonium un coefficient de partage entre les formes libres dans la solution et les formes fixées sur les argiles comme on pourra le voir dans l'annexe I.5.

Malheureusement, il n'existe toujours pas de définition claire de la solution du sol du moins si l'on veut lui donner une base analytique simple et universellement acceptée (CHEVERRY 1983, GAUDIN et al. 1985, LITAOR 1988). En conséquence, les modélisateurs doivent le plus souvent utiliser les résultats d'extraction par une solution molaire de KCl pour se donner une idée de la concentration de la solution du sol en azote minéral au contact des racines. Une telle approximation est légitime en ce qui concerne les nitrates mais elle est paraît plus difficilement acceptable pour l'ammonium dont une bonne partie est théoriquement fixée sur les sites d'échange cationique.

Si on accepte une définition de la solution du sol basée sur une extraction par la solution molaire de KCl, l'ammonium fixé devra être défini par une extraction plus énergétique.

Si la solution du sol est assimilée à l'eau de gravité ou à l'eau extraite à un potentiel donné, le KCl pourrait alors être utilisé pour définir l'ammonium fixé et définir le coefficient de partage évoqué plus haut. Mais la documentation des modèles ne précise pas sur quelles mesures se baser pour décider quel doit être la valeur de ce coefficient de partage dans le cas d'un sol donné.

En général on suppose que la plante absorbe indifféremment l'azote minéral aussi bien sous forme nitrique que ammoniacale ce qui reste à vérifier.

Enfin dans le cas des cultures marquées, on ne sait pas quelle relation établir entre la composition isotopique du mélange d'azote minéral issu du sol et de l'engrais à un moment donné, et ce que la plante aura pu extraire du sol au cours des semaines précédentes.

Nous avons tiré de ces constatations trois questions auxquelles nous avons essayé d'apporter des éléments de réponse.

**Quelle est la quantité d'azote ammoniacal susceptible de migrer librement d'une couche à l'autre sous l'effet du drainage provoqué par une pluie?**

**Quelle peut être la participation respective des nitrates et de l'ammonium à la nutrition azotée d'une plante test?**

**Une culture de plante test pourrait-elle remplacer les incubations dans la mesure où l'azote absorbé par la plante, serait représentatif de l'azote minéral de la solution du sol?**

**Moyens mis en oeuvre :** Les éléments de réponse apportés par le présent travail proviennent des constatations faites d'abord sur le terrain par des mesures de lysimétrie et d'extraction d'azote minéral, puis de deux séries d'incubation et deux cultures de ray-grass qui ont été réalisées en serre avec l'horizon superficiel du sol ferrugineux tropical de Barinas durant les années 1990, 91 et 92 à Mérida. Le travail évoqué dans cette partie représente dix mois de travail à plein temps réparti sur cinq ans pour la lysimétrie (T.ALDANA, B.SILVA, I.LOPEZ) trois mois pour les mesure d'azote minéral durant la culture ( J.PEREZ ) douze mois pour les incubations (Y.ARAQUE, F.LUCENA et B.SILVA) et un an pour les cultures de Ray-Grass (P.URBINA). L'interprétation et la synthèse des résultats représente environ six mois de travail de chercheur (J.M.HETIER)

Les méthodes utilisées sont décrites en détail dans l'annexe II.

## 1. Résultats

### 1.1. Lysimétrie (Annexe I.3)

Les cinq années de mesures effectuées avec six lysimètres (trois par culture) ont amplement démontré que, entre les deux couvertures végétales étudiées, n'apparaissait pas de différence significative en ce qui concerne la quantité d'eau filtrée, laquelle représente environ la moitié des précipitations. La différence entre les deux cultures se manifeste seulement au niveau de la concentration en azote des eaux recueillies.

Dans le cas du fourrage, ne sortent que  $5 \text{ kg.N.ha}^{-1}$  au total dont 1 seulement dérive du fertilisant durant les deux premières années. Dans le cas de la culture de maïs, les pertes annuelles par lixiviation atteignent en moyenne  $25 \text{ kg.N.ha}^{-1}$  dont environ 5kg dérivent du fertilisant au cours des deux premières années.

Il est évident que la composition des solutions qui ont percolé à travers plus d'un mètre de sol correspond aux pores grossiers et ne reflète que de loin celle de la solution du sol au contact des racines. Cependant la différence observée entre les deux cultures, nous montre bien que ces mesures lysimétriques donnent les ordres de grandeur des concentrations minimales que l'on peut trouver dans la solution du sol des deux cultures à savoir 0 à  $3 \text{ mgN.l}^{-1}$  sous fourrage et 3 à 14 sous maïs.

### 1.2. Suivi de la nitrification au champ

Malgré toutes leurs imperfections, ces résultats nous permettent de percevoir certaines caractéristiques des équilibres entre formes nitriques et ammoniacales après une fertilisation par l'urée.

La dominance de l'ammonium dure très peu de temps après la fertilisation et les nitrates varient rapidement entre 5 et  $10 \text{ mg.kg}^{-1}$  alors que les concentrations en ammonium varient entre 0 et  $5 \text{ mg.kg}^{-1}$ . aussi bien en surface qu'en profondeur. Ces variations se relient plus aux épisodes pluvieux qu'à la répartition initiale du fertilisant

### 1.3. Les incubations (Annexe II)

Rappelons brièvement que les incubations d'échantillons de surface organisées en serre ont d'abord servi à suivre la nitrification de l'azote dérivé du sol et du fertilisant en faisant des extractions d'azote minéral successives par l'eau et le KCl en

solution unimolaire. Ces mêmes résultats d'incubation ont ensuite servi de terme de comparaison avec les résultats de cultures de plante test pratiquées en même temps avec le même sol.

Comme on pouvait s'y attendre, la différence H<sub>2</sub>O, KCl ne concerne que l'ammonium qui est deux fois plus abondant dans le KCl au début de l'incubation quand les concentrations d'ammonium dérivée de l'urée sont supérieures à 50 mg.N.l-1. Par la suite, la différence tend à diminuer et au bout de 14 semaines d'incubation les deux concentrations sont presque identiques dans l'eau et le KCl.

Si on observe la provenance de l'ammonium extrait, on constate que dans les deux réactifs l'ammonium dérive du fertilisant dans la même proportion tout au long de l'incubation. On peut donc en déduire l'existence d'un équilibre instantané entre les deux formes libre et échangeable: la forme échangeable alimente la forme soluble en fonction de la disparition de l'ammonium qui alimente la nitrification. En effet, en fin d'incubation, l'azote nitrique a le même excès isotopique que l'ammonium alors qu'en début d'expérience le peu de nitrate présent vient seulement du sol.

Ces résultats semblent légitimer la pratique qui consiste à utiliser le KCl comme réactif représentant la solution du sol en ce qui concerne l'azote minéral. En effet, la partie de l'ammonium qui n'est pas entraînée un jour par la percolation de l'eau de pluie le sera les jours suivants et l'erreur initiale sera vite compensée. Mais dans ce cas là il vaudrait mieux ne pas utiliser un coefficient de partage constant qui introduira une erreur plus grande que si on ne faisait rien. Il y a donc plus d'inconvénients que d'avantages à utiliser le KCl au lieu de l'eau qui a de plus l'intérêt de pouvoir servir d'agent d'extraction pour d'autres éléments participant à la nutrition minérale des plantes.

#### **1.4. Evolution de l'azote minéral de la solution du sol durant les cultures de plante test en serre.**

A mesure que disparaissent les nitrates et l'ammonium de la solution durant la première culture effectuée immédiatement après la fertilisation, leur excès isotopique diminue fortement, ce qui signifie que la minéralisation de l'azote organique du sol continue mais ne compense pas l'organisation microbienne et l'absorption par la plante.

La deuxième culture de ray-grass semée au bout de six semaines de pré-incubation nous montre que les nitrates accumulés pendant cette période ne sont pas absorbés et organisés en priorité. L'azote absorbé par la plante semble plutôt

provenir d'un pool d'azote organique de durée de vie ne dépassant pas quelques semaines et dérivé pour moitié du sol et pour moitié du fertilisant. La somme de l'azote minéral du sol et de l'azote absorbé par la plante est toujours inférieure à l'azote minéral présent à la même époque dans le sol incubé où s'accumulent de grandes quantités de nitrates. Les modifications dues à la plante sont quantitatives et qualitatives: en présence de plante, la minéralisation nette est moindre et l'accumulation de nitrates bien inférieure. De plus, ces nitrates dérivent beaucoup plus du sol que du fertilisant.

La première idée importante qu'il faut retenir de tout ceci est qu'il n'est pas possible d'admettre que la plante utilise d'abord l'azote minéral avant de faire appel à la minéralisation des réserves d'azote organique plus ou moins anciennes du sol. Toute simulation qui s'appuie sur ce postulat ne pourra pas donner de bons résultats. La deuxième idée est que dans tous les cas, l'azote ammoniacal disparaît rapidement en présence de plante ce qui n'est pas forcément vrai de l'azote nitrique.

Les parties aériennes des deux cultures ont extrait au total un peu plus de 100 mg d'azote total dont plus de 80 mg se retrouvent dans les deux premières coupes. En considérant les deux cultures dans leur ensemble on peut considérer un taux moyen de prélèvement de l'ordre de  $1\text{mg.kg}^{-1}.\text{j}^{-1}$ .

Une telle vitesse d'extraction extrapolée au champ pour une culture de 100 jours correspond à  $3\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ . On pourrait considérer cette valeur comme le maximum que pourrait donner ce sol fertilisé. Une telle valeur, comparée à l'extraction réelle du *Digitaria* ou du maïs qui extrait environ  $1\text{kg.N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ , peut être considérée comme une estimation assez raisonnable si l'on tient compte du fait qu'au champ les racines n'exploitent pas autant le sol que dans une culture en vase de végétation.

De telles valeurs peuvent constituer des repères très utiles en modélisation par exemple pour guider l'établissement des limites de stress en combinaison avec les valeurs de concentration dans la solution du sol et dans les tissus aériens de la plante. Elles sont en outre relativement peu coûteuses et faciles à obtenir.

L'azote absorbé vient surtout du fertilisant lorsque le semis est effectué aussitôt après la fertilisation. Dans ce cas seulement, on peut considérer que l'azote absorbé par les parties aériennes du Ray-grass durant les trois premières semaines de cultures représentent assez bien la solution du sol. Lorsqu'on laisse à l'azote dérivé de l'urée le temps de s'organiser et de se nitrifier la plante s'alimente à partir d'un ensemble dérivé pour moitié du sol et du fertilisant alors que la solution peut contenir des nitrates plus marqués que l'azote absorbé.

L'incubation n'est donc pas le meilleur moyen de calibrer les modèles. Il vaudrait mieux utiliser les cultures en serre qui réunissent presque tous les avantages de l'incubation et éliminent ses principaux inconvénients à condition comparer le comportement de la plante test avec celui de la plante dont on veut modéliser les rapports avec le système sol-solution.

### Conclusion de la deuxième partie

On ne voit pas comment un effort d'amélioration de la modélisation du cycle de l'azote dans des systèmes sol plante pourrait être mené à bien sans donner un rôle essentiel à la solution du sol. Les modélisateurs ont avec raison donné un rôle moteur aux mouvements de la solution dans le sol et cela paraît indispensable. Ce rôle central implique des évaluations réalistes des flux d'entrée et de sortie qui peuvent en partie reposer sur des mesures faites en amont dans les compartiment organiques, et en aval dans la plante, compte tenu de l'imprécision insurmontable des mesures directes d'azote minéral dans la solution du sol.

Les incubations devraient être avantageusement remplacées par des cultures en serre de plantes test réalisées avec des engrais marqués. Ces expériences préliminaires permettront de préparer beaucoup mieux les inévitables expériences de terrain qui termineront la calibration du modèle étudié.

La priorité doit être donnée à l'étude de l'ensemble organique azoté qui résulte de l'organisation de l'azote dérivé de l'engrais et du sol pendant cette période critique qui suit la fertilisation. La formation et le comportement de cet ensemble constituent les données indispensables à une simulation du cycle de l'azote car c'est lui qui en fait alimente la solution du sol grâce à l'activité de la biomasse microbienne. Mais il s'agit d'un ensemble plus vaste que la biomasse, et il serait souhaitable de pouvoir y faire des mesures plus faciles à réaliser que celles des flux traversant la biomasse. C'est les sens des tentatives évoquées dans l'annexe consacrée aux fractions organiques.

Pour pouvoir continuer à donner un rôle central à la solution du sol, il faut donner priorité au suivi des évolutions du rapport  $\text{NO}_3/\text{NH}_4$  dans la solution au cours des cultures sans accorder un rôle important aux valeurs absolues des quantités mesurées. Il faut enfin préférer les cultures de plantes tests aux incubations qui peuvent facilement donner des informations erronées sur l'orientation et l'intensité des processus assurant l'alimentation azotée des plantes cultivées.

### **III PARTIE : Compartimentation de l'azote organique: azote protéique et azote organique actif.**

#### **Introduction**

Comme nous l'avons dit à propos de la solution du sol, la meilleure manière de mesurer les flux d'azote qui la traversent est probablement de faire des mesures en amont dans les compartiments organiques qui l'alimentent le plus directement par le processus de minéralisation, et en aval, c'est à dire dans la plante.

L'idée principale qui guide donc l'élaboration du sous-modèle (azote-sol) est de privilégier les mesures à effectuer dans les fractions organiques telles que la biomasse microbienne et les métabolites qu'elle élabore ou utilise à plus ou moins court terme pendant le temps d'une culture. Ce sous-modèle encore en cours d'élaboration sera probablement une simplification de la proposition actuellement faite par les auteurs de NCSOIL. Pour pouvoir alimenter la plante en azote à partir de la solution du sol (compartiment virtuel dans la mesure où l'on y fera pas de mesures de calibrage), on mettra à contribution la mortalité de la biomasse microbienne, la décomposition d'un premier compartiment à temps de résidence court, et d'un second compartiment à temps de résidence plus long. Les deux seront définis par deux extractions sélectives pratiquées en série pour éviter les recouvrements. Le troisième compartiment sera en fait un compartiment puit car sa vitesse de minéralisation très lente représentera des apports négligeables à l'échelle d'une culture.

Pour que l'extraction de ces fractions organiques puissent servir de base à la définition de deux compartiments et soient aisément réalisables par de petits laboratoires en contact direct avec les problèmes du développement agricole des régions tropicales, nous avons écarté à priori les méthodes difficiles à mettre en oeuvre et peu reproductibles. C'est pourquoi après quelques tâtonnements préliminaires nous nous sommes limités à étudier trois fractions pouvant servir de base analytique à la définition des deux compartiments.

Cette partie ne repose pas comme les autres sur une annexe détaillée qui sera en fait constituée par l'essentiel de la thèse de M.ZUVIA encore en cours de rédaction. En attendant nous avons seulement joint les données de laboratoire sur lesquelles sont basées les informations présentées ici.

**Moyens mis en oeuvre :** Ces études ont surtout consisté à suivre des évolutions au cours de cultures de maïs effectuées durant dix semaines en serre avec ou sans traceur et en comparaison avec des incubations sans plantes qui ont servi à préciser certains détails. L'organisation, l'exécution et l'interprétation de ces expériences représente deux ans de travail à plein temps pour un chercheur (M.ZUVIA) et deux techniciens supérieurs (M.SEGOVIA et I.LOPEZ)

## **1. Résultats**

### **1.1. Fractionnement granulométrique.**

Compte tenu de résultats obtenus par l'équipe ORSTOM de Martinique (FELLER et VALONY 1986) nous pensions au départ que le fractionnement granulométrique de la matière organique pourrait au moins constituer une base de départ pour définir les compartiments dont nous avons besoin pour la modélisation. Mais après une période d'apprentissage comprenant, entre autre, un stage dans le laboratoire de l'ORSTOM Martinique, (T.ALDANA) nous avons dû nous rendre compte que l'imprécision sur les bilans d'azote ne peut pas être réduite à moins de 5% sur les fractions fines. Or ce sont celles qui sont censées être les plus sensibles aux entrées et aux sorties d'azote. Cette marge d'imprécision est supérieure à l'amplitude des variations que l'on peut attendre sous l'effet d'une culture. Il était donc illusoire de vouloir définir nos compartiments sur une méthode de ce type.

Par ailleurs, nous pensions également, par un fractionnement granulométrique préalable, éliminer les résidus végétaux non décomposés afin d'éviter de les soumettre à l'action d'un réactif chimique d'extraction différentielle. En fait, le traditionnel tamisage à 2mm est en général suffisant pour éliminer les racines et les plus grands débris végétaux lors de la préparation du sol pour les incubations ou les analyses. Le préalable du fractionnement granulométrique perd alors sa raison d'être. Tous les résultats qui vont être évoqués ici correspondent donc, par définition, à des échantillons de sols débarassés de débris végétaux visibles à l'oeil nu.

### **2.2. L'azote protéique**

Le terme d'azote protéique est une facilité de langage pour désigner la deuxième fraction de l'hydrolyse acide des constituants azotés du sol, la fraction hydrolysable non distillable. La méthode d'hydrolyse acide a fait l'objet de tant de travaux qu'il serait inutile de les évoquer même partiellement. Disons que ceux de GUIRAUD (1984) et de EGOUMENIDES (1987) et de GANRY (1990) sont ceux qui nous ont le plus inspiré pour organiser les essais réalisés.

Après que C. EGOUMENIDES soit venu à Mérida en juin-juillet 1990, entraîner le laboratoire aux déterminations de fractions d'hydrolyse, nous avons appliqué la méthode indiquée, sans chercher à la modifier, pour pouvoir éventuellement faire des comparaisons avec les résultats obtenus à partir des expériences effectuées par le CIRAD sur des sols africains.

Les premières détermination effectués ont concerné l'alfisol du Jardin Botanique de la UNELLEZ (horizon 0-20 cm), prélevé dans des parcelles ayant subi différentes histoires agronomiques:

- soit des parcelles cultivées en maïs mais dont les résidus de cultures et les adventices très abondants pendant l'intersaison avaient été soit enlevés soit brûlés ou au contraire enfouis systématiquement.

- soit des parcelles de savane naturelle ou de prairie artificielle installées pendant quatre ans après quinze ans de culture de maïs.

Les plus pauvres en matière organique des parcelles cultivées, contenaient environ 550 milligrammes d'azote total par kilo de terre sèche dont 41 à 44 % peut être considéré comme azote protéique. La terre de savane contient les plus grandes réserves d'azote total 724 dont 53 % sont sous forme protéique. Quatre ans de prairie permanente ont presque suffi à rétablir la situation initiale: 719 mg.kg-1 d'azote total dont 47 % sous forme protéique.

Ces résultats cohérents nous ont encouragés à continuer dans cette voie qui continuait à paraître prometteuse.

Avec les deux échantillons de sol les plus intéressants (prairie artificielle et sol appauvri par la culture de maïs) nous avons donc organisé une culture de maïs en serre durant 70 jours en mesurant l'azote protéique avant et après la culture. Avant de commenter le résultat obtenu il faut rappeler que d'après les travaux effectués au CIRAD seule une partie de l'azote protéique est censée participer à court terme à la nutrition de la plante. Pour évaluer quantitativement cette partie de l'azote protéique on soustrait une quantité d'azote correspondant aux amino-sucre (fraction hydrolysable distillable). Si cette différence est nulle on considère le sol comme épuisé. C'est ainsi que sur les 53 % d'azote protéique du sol de savane on peut estimer que 20 % sont potentiellement disponibles pour l'alimentation des plantes alors que après quinze ans de culture de maïs cette quantité tombe à 10 %.

Sous l'effet de la culture de 70 jours on voit baisser de 30 mg.kg-1 la quantité d'azote protéique du sol cultivé en maïs. Dans le cas du sol de prairie, cette baisse atteint 50 mg.kg-1. Ce second essai confirmait le premier et nous encourageait à poursuivre. Le prélèvement du sol nécessaire à cette première culture avait été effectué en fin de saison sèche. Celui de la culture suivante a été effectué en septembre un mois avant la récolte du champ de maïs.

Nous avons donc organisé un troisième essai toujours basé sur une culture de 70 jours en serre dans les mêmes conditions. La seule différence provenait de la date de prélèvement des échantillons de terre. Cette différence devait nous garantir la validité et la reproductibilité de la première observation. Pour approfondir l'interprétation des résultats nous avons cette fois marqué l'urée ajoutée comme fertilisant.

Le résultat obtenu a été différent des précédents. Sous l'effet de la culture, l'azote protéique augmente dans les témoins non fertilisé. Donc l'état initial du sol avant de le conditionner pour la mise en culture influe beaucoup sur la minéralisation de l'azote du sol. Le sol cultivé prélevé en fin de saison sèche perd une part notable de son azote protéique sous l'effet de la culture alors que le sol prélevé en septembre voit augmenter son azote protéique sous l'effet de la culture.

L'introduction du fertilisant produit un effet contradictoire dans deux échantillons du même sol. Dans le cas du sol de prairie, la diminution de l'azote protéique sous l'effet de la culture est notable, alors que dans le sol cultivé la fraction protéique augmente encore plus que dans le témoin sous l'effet conjoint de la culture et de la fertilisation. Dans tous les cas, les écarts sont à la limite du significatif malgré tout le soin apporté à la réalisation des mesures.

Les raisons de ces résultats contradictoires, ne sont pas faciles à élucider. Les faibles quantités d'azote nitrique mesurées avant et après la culture ne semblent pas de nature à fausser les résultats. D'autre part, le marquage de l'urée nous permet de constater que la quantité de fertilisant organisé en 70 jours est insuffisante pour expliquer l'augmentation mesurée.

La conclusion tirée de cette dernière expérimentation est que cette fraction est effectivement sensible à la culture, mais pas d'une manière qui permette d'en faire un compartiment mesurable d'azote organique actif. Nous avons donc décidé d'en rester là et de chercher une méthode plus simple et plus conforme aux nécessités de la modélisation.

### 2.3. L'azote dispersable et oxydable.

Un réactif dispersant peu énergétique,  $\text{NaHCO}_3$  permet de différencier une fraction d'azote peu abondante, relativement constante mais qui se marque rapidement après la fertilisation mais perd tout le traceur en fin de culture. Un réactif oxydant plus énergétique, mobilise une quantité d'azote cinq fois plus grande que la première et qui se marque très peu mais dont la quantité varie beaucoup sous l'effet de la culture.

A partir de ces deux fractions, nous pensons pouvoir définir deux compartiments utilisables en modélisation. Le premier sera un petit compartiment représentatif de la biomasse et de ses métabolites et affecté d'un turn-over rapide. L'autre compartiment plus vaste correspondrait à des constituants azotés plus anciens et serait affecté d'un turn-over plus lent. Le reste de l'azote organique serait mesuré par différence et aurait une fonction de puit à l'échelle de temps de la culture.

### 3. Discussion

Des difficultés de tous ordres sont venues retarder les progrès à réaliser sur ce point.

#### **Difficultés liées à la stratégie choisie.**

Il était sain de vouloir substituer la définition conceptuelle des compartiments par une définition pratique basée sur un fractionnement facile et reproductible. Par contre, ce fut une erreur de croire que les résultats agronomiques intéressants à l'échelle pluriannuelle obtenus par les hydrolyses par l'acide concentré à chaud pouvaient conduire à définir un compartiment utilisable à l'échelle de temps d'une culture.

#### **Difficultés liées aux conditions de la recherche.**

De la même manière, il était sain de vouloir substituer les cultures aux incubations pour tester des méthodes et éviter ainsi de devoir faire des transpositions hasardeuses. Mais si les cultures en serre ne sont pas beaucoup plus longues que les incubations, il a fallu organiser une serre permettant de réaliser de bonnes cultures ce qui n'est pas facile en montagne sous un climat froid et peu lumineux pendant une bonne partie de l'année.

#### 4. Conclusion sur la compartimentation de l'azote

On considère que l'azote des résidus végétaux ne pose pas de problème majeur du fait de leur évaluation facile par tamisage.

Même s'il constitue un bon indice d'évolution de la fertilité azotée des sols tropicaux, l'azote protéique ne peut pas servir de compartiment mesurable pour la simulation du cycle de l'azote dans les sols cultivés.

Il semble que l'azote dispersable par le bicarbonate constitue une fraction proche de la biomasse, de turn-over rapide et peut être une bonne base de définition pour un compartiment d'entrée de l'organisation.

L'azote oxydable par le permanganate pourrait donner la base de la définition d'un compartiment d'un volume plus grand et de turn-over plus lent.

Le reste de l'azote organique du sol serait considéré comme un compartiment puit dont on réajusterait le volume et le contenu en azote dérivé de l'engrais au début de la simulation de chaque cycle annuel.

L'azote minéral resterait un compartiment virtuel entre l'azote organique et la plante. Le contenu en azote de la plante donnerait une évaluation par défaut de la minéralisation nette.

#### IV DISCUSSION GENERALE

Par rapport aux objectifs et au plan de travail initiaux certains changements intervenus méritent un minimum de discussion.

Tout d'abord, nous pensions initialement que les modèles existants étaient utilisables en l'état moyennant quelques aménagements mineurs sauf en ce qui concerne l'azote. Cette vision des choses s'est avérée illusoire pour deux raisons principales.

Premièrement, si on veut utiliser la plante pour juger de la qualité de simulation du cycle de l'azote il faut bien dominer le fonctionnement des sous-systèmes, par exemple celui de la simulation de la croissance des feuilles et la translocation de l'azote des feuilles aux grains. Le jeu des interactions entre photosynthèse et absorption de l'azote est trop important et trop variable d'une variété à l'autre pour qu'on puisse faire l'impasse sur ces aspects sous prétexte qu'ils n'appartiennent pas à l'objectif direct

de la recherche entreprise. Ou alors il faudrait remettre en cause la stratégie choisie dès le départ qui consistait à essayer d'améliorer les parties concernant l'azote des modèles existants plutôt que d'inventer un sous-modèle azote-sol, sans se préoccuper du contexte dans lequel il serait éventuellement utilisé.

Deuxièmement, l'azote minéral suit dans le sol les mouvements de l'eau, entièrement en ce qui concerne les nitrates, en partie en ce qui concerne l'ammonium. Il n'est donc pas possible non plus de faire une proposition sérieuse concernant l'azote sans bien savoir comment sont simulés les mouvements de l'eau.

Au fur et à mesure que la lecture des modèles progressait, nous nous sommes rendus compte de leurs faiblesses et des difficultés que représentait leur utilisation en milieu tropical. Ces difficultés sont de deux types. Soit les solutions proposées par les modèles actuels conduisent à des simulations médiocres quelque soit le milieu. Soit elles reposent sur des hypothèses qui sont logiques en milieu tempéré mais pas en milieu tropical. Nous nous sommes surtout attaché à réfléchir aux améliorations à apporter aux difficultés du deuxième type. Mais si on veut éviter de déconsidérer la modélisation comme méthode d'approche des problèmes de gestion des écosystèmes cultivés, il faut se placer dans une perspective d'amélioration de l'ensemble des systèmes. On évitera ainsi des promotions prématurées de modèles peu performants qui conduisent d'abord à des déceptions et ensuite à prolonger l'anarchie qui caractérise la planification actuelle de la recherche dans le domaine de la gestion des sols cultivés.

En effet, les résultats du présent projet avaient comme finalité plus lointaine de faire des modèles améliorés des instruments d'aide à la gestion de la ressource en sol. Dans cette perspective, tout le travail de débroussaillage et de démystification auquel nous avons dû nous livrer au cours de cette lecture des modèles n'était pas prévu mais n'est pas perdu.

De même, il faut avoir réalisé des cultures de référence pour avoir une idée précise de l'importance de la qualité des mesures de calibrage et de la manière d'organiser les cultures pour obtenir des réponses précises à des questions précises.

Le travail effectué sur la solution du sol a été également émaillé de surprises enrichissantes. Il confirme la supériorité des cultures de plante test sur les incubations et montre par exemple l'importance de préciser les préférences éventuelle de la plante pour l'ammonium par rapport aux nitrates quand elle a le choix.

Cette préférence peut avoir des conséquences sur les pertes par dénitrification et par lixiviation d'une part, et sur la simulation des éventuels stress d'azote d'autre part.

Il était prévisible que le travail sur la compartimentation de l'azote organique serait le plus ardu. Sur ce point, les difficultés les plus grandes ont été liées d'abord à l'environnement scientifique et technique qui ne favorisait pas les échanges nécessaires à des progrès rapides. De plus la nécessité d'une grande précision et reproductibilité des résultats pour pouvoir déboucher sur une proposition concrète et réaliste n'est pas compatible avec la rapidité.

Cependant le travail effectué nous a permis de nous convaincre du fait que les recouvrements de fractions sont à éviter absolument. Les extractions séquentielles de fractions représentatives des compartiments à définir constitue la première partie de la démarche à suivre. Il faut la combiner avec la dilution du traceur isotopique dans des ensembles nécessairement plus vastes dont les fractions définies analytiquement constituent des sous ensembles.

Ce contrat nous a permis d'obtenir des résultats parfois discutables et imparfaits, mais il a eu le grand mérite de nous permettre de progresser et de mettre notre équipe en condition de transformer l'essai dans le cadre de notre actuel programme CEE.

## V CONCLUSIONS GENERALES

Au terme de ces trois ans de recherche, nous cernons beaucoup mieux les problèmes posés par la simulation du cycle de l'azote dans le sol tropical étudié.

L'adaptation des modèles à l'utilisation en milieu tropical ne peut être menée à bien qu'en toute connaissance de cause et non pas à l'aide de quelques transpositions plus ou moins hâtives.

Pour pouvoir percevoir, à travers la plante, la qualité de la simulation proposée pour l'azote, il est indispensable d'avoir à la fois une vision globale du système de simulation et de le connaître dans tous ses détails.

Pour simuler le comportement de l'azote dans un sol cultivé, il faut connaître les termes principaux du bilan de l'azote et de l'eau dans le système sol plante étudié.

Il faut bien comprendre le rôle de la solution du sol mais éviter de calibrer avec les mesures d'azote minéral.

Définir les compartiments d'azote organique est possible en combinant un fractionnement chimique séquentiel avec le tracage isotopique.

L'existence des modèles mis au point en conditions tempérés est certes un avantage non négligeable pour promouvoir leur diffusion dans la gestion des systèmes de culture tropicaux, mais ce serait une erreur de croire que quelques ajouts et quelques transformations suffiront à les rendre opérationnels en régions tropicales.

Un des principaux atouts de la modélisation étant de constituer un bon support pour la planification des recherches il est tout à fait souhaitable que les organismes promoteurs de recherche aient une politique à développer dans ce domaine et qu'ils puissent exercer ainsi un rôle de coordination qui en général échappe aux exécutants.

## BIBLIOGRAPHIE GENERALE

### BIBLIOGRAPHIE GENERALE

- ACEVEDO (D.) 1987 Economía hídrica de dos agrosistemas tropicales: una pastura permanente y un cultivo de maíz. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Universidad de los Andes 163 p.
- ARAQUE (D.Y.) 1990 Determinación en condiciones de laboratorio, de la evolución del nitrógeno mineral de un alfisol de la serie Barinas bajo dos tratamientos de fertilización. Trab. de Grado IUTE
- ADDISCOT (T.M.), WANEGET (R.J.) 1985 - Concepts of solute leaching in soils: a review of modeling approach. J. Soil Sci. 36 : 411-424
- BROADBENT (F.E.) 1986 - Empirical modeling of soil nitrogen mineralization. Soil Science 141 N° 3: 208-213
- CARBERRY (P.S.), MUCHOW (R.C.), Mc COWN (R.L.) 1989 - Testing the CERES Maize simulation model in a semi arid-tropical environment. Field Crop Res. 20 : 297-315
- CARILLO (C.E.) 1980 - Mineralización de la úrea en algunos suelos venezolanos. Tesis de Magister Sci. Univ. Central de Venezuela Maracay
- CHAUSSOD (R.) 1993 Biomasse microbienne et statut-organique des sols Cahiers de l'ORSTOM N° spécial matière organique (à paraître)
- CHEVERRY C. 1983 L'extraction de la "solution du sol" par le biais des bougies poreuses: une synthèse des bibliographique des problèmes méthodologiques posés par ces dispositifs. Bulletin du GFHN No 14 : 47-71
- CHOTTE (J.L.) 1986 Evolution d'une biomasse racinaire doublement marquée (14C, 15N) dans un système sol-plante. Thèse doctorat Université de Nancy I 116 p. Annexes
- DELGADO (R.), COMERMA (J.), BISBAL (E.C.) 1989 Validation de los aspectos balance de agua y nitrógeno del modelo CERES-MAIZ. I Validacion del balance de agua. X Congreso venezolano de la ciencia del suelo Maturin 2-8 de Julio 1989

- DELGADO (R.), COMERMA (J.), BISBAL (E.C.) 1989 Validation de los aspectos balance de agua y nitrogeno del modelo CERES-MAIZ. II Validacion del balance de nitrogeno. X Congreso venezolano de la ciencia del suelo Maturin 2-8 de Julio 1989
- EGOUMENIDES (C.), RISTERUCCI (A.), MELEBOU (R.E.) 1987 Appréciation de la fertilité azotée des sols tropicaux: étude des fractions organiques de l'azote. L'Agron.Trop. 42 (2) : 85-93
- FELLER (C.), VALONY (M.J.) 1986 Utilisation des résidus de canne à sucre dans un agrosystème tropical: effet sur la nutrition minérale de la plante et sur le stock organique du sol. Etude avec 15N. Rapport final convention N° C71 "CORDET Agronomie" Rapport multicop. 18 p. + Annexes ORSTOM Martinique
- FELLER (C.), GUIRAUD (G.), HETIER (J.M.), MAROL (C.) 1988 - Study by size fractionation of the organic matter in a cultivated tropical soil fertilized by labelled crop residues (14C-15N) and urea 15N. Trans. 12th Int.Cong.Soil Sci. 6 : 58
- FOTH (H.D.) 1962 - Root and top growth of corn. Agronomy Journal 54 : 49-52
- GANRY (F.) Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat d'Etat en Sciences Naturelles Univ. Nancy II 355 p.
- GAUDIN (R.), DUPUY (J.), RANAIVO (J.) 1985 Les bougies poreuses, un outil pour suivre NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> en solution dans les sols de rizières -I. Etude bibliographique. L'Agron.Trop. 40, 1 : 26-32
- GIROUX (M.), SEN TRAN (T.) 1987 Comparaison des différentes méthodes d'analyse de l'azote du sol en relation avec sa disponibilité pour les plantes. J.of Soil Science 67: 521-531
- GREENLAND (D.J.), WILD (A.), ADAMS (D.) 1992 - Organic matter dynamics in Soils of the tropics-From myths to complex reality. in Myths and Science of Soils of the Tropics SSSA Special Publication N° 29 p. 17-35
- GUIRAUD (G.) 1984 - Contribution du marquage isotopique à l'évaluation des transferts d'azote entre les compartiments organiques et minéraux dans les systèmes sol-plante. Thèse d'état, Université P. et M. Curie Paris VI, 336 p.

- GUIRAUD (G.), FARDEAU (J.C.) 1977 - Dosage par la méthode Kjeldahl des nitrates contenus dans les sols et les végétaux. Ann. Agron. 28 : 329-333
- HETIER (J.M.), SARMIENTO (G.),ALDANA (T.), ACEVEDO (D.), ZUVIA.(M.) THIERY (J.) 1989 - Nitrogen fate under maize and pasture cultivated on an alfisol in the Western Llanos savannas, Venezuela. Plant and Soil 114, 295-302
- HETIER (J.M.), SHARGEL (R.), VALLEJO TORRES (O.), SARMIENTO (G.), GOMEZ (C.) 1993 - Los suelos de savana de los llanos venezolanos y el alfisol de Barinas. Cahiers de l'ORSTOM Ser. Pedol. sous presse
- HODGES (T.), BOTNER (D.), SAKAMOTO (C.), HAYS AHUG (J.) 1987 - Using the CERES MAIZE model to estimate production for the U.S. corn-belt. Agric. Forest. Meteorol. 40 : 293-303
- HOUOT (S.), MOLINA (J.A.E.), CHAUSSOD (R.), CLAPP (C.E.) 1989 - Simulation by NCSOIL of net mineralisation in soils from "Deherain" and "36 Parcelles" fields at Grignon. Soil Sci. Soc. Am. J. 53 : 452-455
- JENKINSON, 1968 Chemical Tests for potentially available Nitrogen in Soils. Journ.Sci Fd.Agric. 19: 160-168
- JONES (C.A.), KINIRY (J.R.) 1986 - CERES-MAIZE asimulation model of maize growth and development Texas A and M University Press.
- LADD (J.N.), JOCTEUR-MONROZIER (L.), AMATO (M.) 1992 - Carbon turn over and nitrogen transformation in an alfisol and vertisol amended with (14C) Glucose and (15N) ammonium sulfate. Soil Biol. Biochem. 24 (4) : 369-371
- LEON (E.R.) 1982 - Caracterización de nueve materiales genéticos de maíz en cuanto a su captación de energia y otros aspectos arquitectónicos y morfológicos en su relación con los rendimientos. Tesis Universidad Central de Venezuela Maracay
- LITAOR M.I. 1988 Review of soil solution samplers. Water Resour. Res. 24: 5: 727-733
- LIU (W.T.H.), BOTNER (D.M.) SAKAMOTO (C.M.) 1989 - Aplicacion of CERES-MAIZE model to yield prediction of a brazilian maize hybrid. Agric. Forest. Meteorol. 45 : 299-312

- MARRERO (J.F.) 1987 - Determination de los coeficientes genéticos del modelo de simulación CERES-MAIZ en seis cultivares de maíces venezolanos para predecir sus relaciones genotipo-ambiente. Tesis MSc. Universidad Central de Venezuela Maracay
- MAYTIN (C.), AZOCAR (A.), RADA (F.), ZUVIA (M.), HETIER (J.M.) 1991  
Medidas de campo de punto de marchitez para un Alfisol de la Serie Barinas. Comm.al I Congreso venezolano de Ecología Univ.S.Bolivar Caracas 06.1991
- MAYTIN (C.), HETIER (J.M.), ZUVIA (M.), AZOCAR (A.), PEREZ (J.) 1991  
Determinacion del limite inferior de Agua extraible por el Maiz hibrido CENIAP PB 8 en el Jardin botanico de la UNELLEZ Barinas  
Comunicacion presentada al Congreso de Botanica Guanare nov.1991
- MONSI (M.), SAEKI (T.) 1953 - Uber den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung fur die Stoffproduktion. Japan J. Bot. 14 : 22-52
- MONTEITH (J.L.), 1977 Climate and efficiency of crop production in Britain. Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B 281 : 277-329
- MOLL (R.H.), KAMPRATH (E.J.) 1982 - Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agron. J. 74 : 562-564
- MOUTONNET P., PAGENEL J.F., FARDEAU J.C. 1993 The tensionic, a new instrument for field measurements of top soil nitrates.  
Soil Sci. Amer.J. (sous presse)
- MUCHOW (R.C.) 1988 - Effect of nitrogen supply on the comparative productivity of maize and sorghum in a semi-arid tropical environment. In Leaf growth and leaf nitrogen Field Crops Research 18: 1-16
- ORDAZ (A.E.) 1986 - Demanda atmosférica y uso del agua en maíz sometido a restricciones hídricas. Tesis MSc. Universidad Central de Venezuela Maracay
- PIERI (C.) 1985 Fertilité des terres de Savannes. Bilan de trente ans de recherche y de Développement agricoles au sud du Sahara. (ed.)Min. Coop. y CIRAD-IRAT
- PAUL (E.A.), CLARK (F.E.) 1989 Soil microbiology and Biochemistry  
Academic. Press Inc, p. 125.

- RITCHIE (J.T.) 1972 - A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res* 8 : 1204-1213
- RITCHIE (S.W.), HANWAY (J.J.) 1982 - How a corn plant develops  
Special Report N° 48 Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service Ames. Iowa
- SALAS R.E. (1984) Efecto de dosis y fraccionamiento de nitrógeno con diferentes poblaciones en tres híbridos de maíz. Trabajo de ascenso Universidad Central de Venezuela Maracay
- SARAGONI H., POSS R., OLIVER R. (1990) Dynamique et lixiviation des éléments minéraux dans les terres de barre du sud du Togo.  
*Agronomie tropicale* 45-4, 259-273
- SCHWERTMANN U., HERBILLON A.J.(1992) Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils.  
SSSA Special publication No 29, 3, p.47-60
- URBINA (P.) 1990 - Algunos datos de campo para ser utilizados en los modelos de simulacion CERES, EPIC y NCSWAP. Trabajo de Grado IUTE de Agrotecnia Ejido 70 p.
- VACHAUD (G.), VAUCLIN (M.), COLOMBANI (J.) 1981 Bilan hydrique dans le sud tunisien. I caractérisation expérimentale des transferts dans la zone saturée. *J.Hydrology* 49: 31-52
- ZUVIA (M.) 1989 Introduction à la modélisation dy cycle de l'azote dans deux types d'agrosystèmes dérivés des savanes. Monographie Université de Paris-Sud, Laboratoire d'Ecologie végétale

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

**INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)**

**Nom du laboratoire :**

**SOMOS ULA-ORSTOM**

**Adresse :**

**Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA**

**HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.**

**SIMULATION MATHÉMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE I.1.**

**Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie**

**Mai 1993**

**Décision d'aide N° 89 L 0531**

## Comparaison de trois modèles choisis pour la simulation du cycle de l'azote dans les agro-systèmes tropicaux

Jean-Marie HÉTIER <sup>(1)</sup>, Marilena ZUVIA <sup>(1)</sup>, Sabine HOUOT <sup>(2)</sup> et Jean-M. THIÉRY <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> ORSTOM, Proyecto ULA-ORSTOM, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela - <sup>(2)</sup> Lab. Sols, Inst. nat. agron., Paris-Grignon, 78850 Thiverval-Grignon - <sup>(3)</sup> DPVE (Département de Physiologie végétale et Écosystèmes), CEN-Cadarche, F-13108 St-Paul-les-Durance

### RÉSUMÉ

*Avant d'aborder la phase expérimentale d'une recherche destinée à formuler et calibrer un sous-modèle azote-sol basé sur des fractions organiques, une révision des modèles décrivant la dynamique de l'azote dans les agro-systèmes a été réalisée. Trois d'entre eux ont été étudiés en détail et seront utilisés pour servir de contexte à l'élaboration du sous-modèle basé en priorité sur les diverses fractions organiques de l'azote ;*

*– NCSWAP : qui simule la dynamique de l'azote dans les systèmes sol-plante-eau ; NCSOIL y constitue le sous-modèle azote-sol ;*

*– CERES : modèle ancien et bien documenté spécialisé dans la prévision de production du maïs ;*

*– EPIC, un des seuls modèles à suivre l'influence de l'érosion sur la production végétale et des caractéristiques du sol sur la croissance des racines.*

*La principale conclusion de cette étude préliminaire est que, en dehors d'une prévision empirique des résultats de récolte pouvant toujours s'obtenir par ajustement arbitraire des paramètres, la principale utilité actuelle de ces modèles est de mieux structurer notre connaissance et de délimiter notre ignorance sur le fonctionnement réel des sols. Cet effort de modélisation permet donc d'orienter les priorités de recherche.*

**MOTS-CLÉS :** Modélisation - Simulation - Cycle de l'azote - Agro-systèmes tropicaux - Savane.

### ABSTRACT

#### COMPARISON OF THREE MODELS SELECTED FOR NITROGEN CYCLE SIMULATION IN TROPICAL AGROSYSTEMS

*Before starting the experimental work necessary to elaborate and calibrate a model simulating soil nitrogen dynamics under tropical conditions, the already existent models about nitrogen in temperate agrosystems were reviewed. Among them, three were compared in details, which will be used to structure our model about nitrogen in tropical soils :*

*– NCSWAP, a simulation model of the soil-crop-water systems, built around NCSOIL computing the dynamics of C and N transformations in soils ;*

*– CERES, one of the oldest models, well documented, predicting the maize yield ;*

*– EPIC, one of the few models including the erosion impact on the crop production and soil characteristics impact on root growth.*

*These models, except crop yield predictions got by parameters tuning, mainly improve our knowledge about nitrogen turnover in soils and provide a structured evaluation of our ignorance, allowing a better orientation of research programs.*

**KEY WORDS :** Modeling - Simulation - Nitrogen cycle - Tropical agrosystems - Savanna.

## INTRODUCTION

Le présent travail constitue la première étape d'une recherche portant sur deux agro-systèmes tropicaux, culture annuelle de céréales et prairie permanente, qui constituent les pôles principaux de la mise en valeur agricole des 20 millions de km<sup>2</sup> de savane, soit la plus grande réserve de terres cultivables encore en friche dans le monde (PIERI, 1985). Ces agro-systèmes ont un fonctionnement encore en grande partie mal connu. Les modèles réalisés en zone tempérée se basent sur une connaissance très détaillée de systèmes de culture étudiés depuis longtemps, en particulier grâce à l'existence d'expériences agronomiques de longue durée. Sur bien des points, le fonctionnement des agro-systèmes tropicaux est différent de celui des agro-systèmes tempérés. Mais l'existence des modèles peut servir à gagner beaucoup de temps dans la production et la structuration des connaissances nécessaires à équilibrer deux préoccupations d'égale importance pour la mise en valeur agricole des savanes tropicales : l'augmentation immédiate de la production et le maintien à long terme de leur fertilité.

Cette première étape a consisté à analyser une série de modèles prenant déjà en compte l'azote du sol et susceptibles de servir de base de réflexion sur la dynamique des échanges d'azote entre le sol, l'engrais et la plante. Parmi les modèles examinés, nous en avons sélectionné trois, NCSWAP (CLAY *et al.*, 1985), CERES (JONES et KINIRY, 1986), EPIC (WILLIAMS *et al.*, 1984), pour servir de cadre à une première série d'expériences destinées à se familiariser avec l'utilisation de ces instruments de simulation en zone tropicale. Une deuxième série d'expériences plus spécifiques, servira ensuite à proposer un modèle azote-sol essentiellement basé sur des compartiments définis à partir de fractions organiques.

Après une série de définitions indispensables à la compréhension du présent article par les non spécialistes, nous essayerons de dégager tout d'abord les éléments communs que l'on retrouve à la base des trois modèles étudiés. Puis, nous ferons ressortir les différences propres à chacun des modèles.

En conclusion, nous présenterons les orientations actuelles du travail expérimental prévu.

## 1. DÉFINITIONS

### 1.1. Le modèle d'agro-système

Ce terme désigne une représentation statique ou dynamique d'un système climat-sol-solution-plante dont la structuration en compartiments reliés par des flux d'énergie et de matière, reflète surtout les objectifs et les connaissances de l'auteur. Par exemple,

EPIC, dont l'auteur veut évaluer les pertes d'azote organique par ruissellement, prend en compte la violence des pluies et un facteur de rugosité du sol que ne mentionne aucun autre modèle.

### 1.2. Compartiment et fraction

Un compartiment doit être un sous-ensemble de constituants, théoriquement homogène, au moins quant à une propriété chimique ou biologique. Cette condition est rarement réalisée et vérifiable dans la pratique, car la définition des compartiments est généralement plus conceptuelle qu'analytique.

La séparation des fractions organiques ou organo-minérales sur la base d'une pratique analytique bien définie, peut par contre déboucher sur une définition plus précise des compartiments d'azote organique du sol. La recherche méthodologique peut ensuite consister à améliorer leur homogénéité par rapport à la propriété choisie comme prioritaire.

### 1.3. La simulation

La simulation consiste à faire apparaître les états successifs des compartiments grâce à un système mathématique de transformations des données (analytiques ou expérimentales) définissant l'état initial (DELFORGE, 1984).

Dans les équations de la simulation, il est d'usage de distinguer :

- les *conditions initiales*, qui définissent l'état initial du système ;
- les *variables externes*, qui ont une influence sur le système mais ne sont pas modifiées par son évolution (par exemple les données climatiques dans un système climat-sol-plante de taille réduite) ;
- les autres variables caractéristiques du système, parmi lesquelles on considère les *entrées* (généralement modifiables par l'expérimentateur), les *sorties* (généralement mesurables), ainsi que les *variables intermédiaires* (qui servent à calculer les contenus successifs des compartiments mais ne font pas l'objet de contrôles expérimentaux).

A côté des variables, on appellera *paramètres* les constantes ou les fonctions fixées qui ne changent pas au cours du processus de simulation.

### 1.4. La calibration

La calibration d'un modèle consiste à *ajuster* les valeurs des paramètres pour que les sorties du modèle correspondent aux valeurs expérimentales obtenues au champ ou au laboratoire.

Cette calibration se fait dans des conditions climatiques et édaphiques bien déterminées, ce qui fait que, à ce stade, le modèle calibré n'a de valeur prédictive que locale.

### 1.5. La validation

Une fois calibré, le modèle dont on veut faire un usage plus général, doit être *testé* dans des conditions différentes de sol, de climat et de culture. Le terme validation désignera cette phase de généralisation du modèle consistant à établir les lois de variation des paramètres en fonction du type de sol, du mode de culture et du climat.

## 2. CARACTÈRES COMMUNS À NCSWAP, CERES ET EPIC

### 2.1. La compartimentation du système sol

En ce qui concerne l'azote, les compartiments essentiels sont (fig. 1) : l'azote minéral (MIN), la matière organique "fraîche" (MOF), la biomasse microbienne (BIO) et l'"humus" (HUM). Ces compartiments peuvent être regroupés, ou subdivisés, comme nous le verrons plus loin. L'azote total et l'azote minéral sont les seules mesures qui sont effectuées dans les trois cas étudiés.

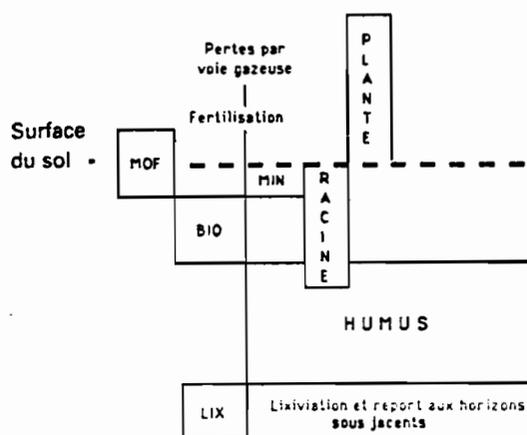


FIG. 1. - Schéma général des modèles étudiés.  
*General design of the studied models.*

Les trois modèles choisis utilisent le même nombre de compartiments dans chacune des couches de sol dont le nombre est déterminé en fonction des caractéristiques du profil cultural et des mesures prévues.

### 2.2. Les flux d'échange entre les compartiments

Une des règles appliquées par la plupart des auteurs est que les sorties de compartiments sont assimilables à des transformations suivant des cinétiques du premier ordre ( $C = C_0 e^{-kt}$ ). Bien que le caractère arbitraire de cette pratique ait été clairement mis en évidence par BROADBENT (1986), elle continue à être très employée à cause de sa simplicité.

Dans la figure 1, seuls les compartiments les plus utilisés dans les modèles d'agro-systèmes sont représentés, et les flux d'échange, qui diffèrent notablement d'un modèle à l'autre, sont symbolisés par des axes verticaux ou horizontaux communs aux compartiments communiquant entre eux.

Ce schéma simplifié ne rend pas compte des mouvements de l'eau, seulement symbolisés par l'axe FER (Fertilisants)-LIX (N lixivié).

### 2.3. La plante

Si on voit un système de simulation comme un mécanisme d'horlogerie, on peut considérer que le moteur du modèle est la croissance de la plante. Celle-ci va suivre soit une courbe de croissance potentielle définie a priori, soit une fonction dépendant de la radiation photosynthétiquement active. En conséquence, les données climatiques sont indispensables dans tous les modèles d'agro-systèmes.

La croissance quotidienne réelle est alors calculée par ajustement à l'aide de facteurs multiplicatifs reflétant les déficiences d'azote et les éventuels stress thermiques ou hydriques.

La production de matière sèche et l'extraction des nutriments par la plante constituent les valeurs les plus accessibles pour réaliser la calibration et la validation du modèle.

### 2.4. L'eau

Les modèles calculent le transfert de l'eau d'une couche à l'autre en vue de déterminer les conditions d'humidité qui règlent l'activité biologique du sol et l'absorption racinaire. L'eau sert également de vecteur de transfert de l'azote nitrique dans tous les modèles.

### 2.5. L'azote

Les valeurs du rapport C/N, choisies par les auteurs pour chacun des compartiments, imposent tout d'abord des vitesses de transformation aux fractions labiles et résistantes des résidus de récolte et des pools organiques. En effet, de ces valeurs dépend la vitesse de sortie du carbone à l'occasion du processus de minéralisation. D'autre part, le rapport C/N du compartiment d'arrivée sert à déterminer la quantité d'azote à prélever dans le compartiment d'azote minéral pour former les constituants organiques ayant la composition prévue. Ce chiffrage de l'importance et de la dynamique des processus de minéralisation et d'organisation constitue le point crucial de tout modèle azote-sol. Il constitue en outre une des seules manières de prendre en compte le type de sol par les modèles d'agro-systèmes.

CARACTÉRISTIQUES DES MODÈLES	NCSWAP	CERES	EPIC
OBJECTIFS	Intégrer les dynamiques de l'eau et de l'azote dans les systèmes sol/solution/plante en fonction de la résistance des fractions organiques à la biodégradation.	Prévoir les effets des facteurs climatiques, hydriques, génétiques et de la disponibilité de l'azote sur le développement et la production du maïs.	Effet du ruissellement du drainage et de la densité du sol sur le développement racinaire et par conséquent le développement et la production de diverses cultures.
PRATIQUES AGRICOLES PRISES EN COMPTE	Fertilisation Irrigation Densité de semis Labour	Fertilisation Irrigation Densité de semis Génotype	Fertilisation Irrigation Labour Contrôle de l'érosion Pesticides
PROCESSUS IMPLIQUÉS	1 Distribution des résidus de culture décomposés. 2 Minéralisation et organisation de la biomasse microbienne (pool I) 3 Minéralisation et organisation de l'humus (Pool II) 4 Transport d'azote par la solution du sol. 5 Nitrification et dénitrification 6 Adsorption d'ammonium par les argiles. 7 Extraction racinaire par mass-flow. 8 Rhizodéposition par nécrose et exsudation racinaire.	1 Décomposition des résidus et immobilisation correspondante d'azote minéral. 2 Minéralisation de l'humus. 3 Nitrification et dénitrification. 4 Transport d'azote par la solution du sol. 5 Extraction racinaire de N. 6 Nécrose et minéralisation des racines.	1 Minéralisation des résidus et immobilisation correspondante d'azote minéral. 2 Minéralisation de l'humus. 3 Nitrification et dénitrification. 4 Transport d'azote par la solution du sol. 5 Extraction racinaire de N. 6 Pertes de matière organique par érosion éolienne et/ou ruissellement. 7 Fixation N atmosphérique.
COMPARTIMENTS DE L'AZOTE DU SOL	1 Résidus de culture. 2 Biomasse microbienne Pool I, labile. 3 Biomasse microbienne P. I résistant (94,4%). 4 Humus Pool II labile 5 Hum. P. II résistant (84%). 6 N NH 4 7 N NO 3	1 Matière organique "fraîche" i.e. résidus de culture et biomasse microbienne. 2 Azote des racines. 3 Azote de l'humus à décomposition lente. 4 N NH 4 5 N NO 3	1 Matière organique "fraîche" i.e. résidus de culture et biomasse microbienne. 2 Azote de l'humus à décomposition lente. 3 N NH 4 4 N NO 3
VALEURS DU C/N POUR LES COMPARTIMENTS CI-DESSUS	1 C/N = variable d'entrée 2 C/N = variable d'entrée (6 à 12) 3 C/N = variable d'entrée (6 à 12) 4 C/N = variable d'entrée (10 à 30) 5 C/N = variable d'entrée (10 à 30)	1 C/N = variable d'entrée 2 C/N = 30 3 C/N = 10	1 C/N = 10 pour la biomasse microbienne 2 C/N = 10
DISTRIBUTION DES FLUX DE C OU D'AZOTE	20 % du C Bio va de Bio à Hum 60 % du C Bio reste dans Bio 20 % du C Hum va de Hum à Bio 60 % du C Hum reste dans Hum Les 20 % restant sortent du système.	20% de N va de MOF à Hum 80 % de N va de MOF à NH 4	20% de MOF va vers Hum si le C/Ni. (N minéral compris) est < 15 80 % de MOF va vers Hum si le C/Ni. (N minéral compris) est < 25 100 % de MOF va vers N minéral si le C/Ni. (N minéral compris) est > 25 pendant la décomposition
CONSTANTES DE VITESSE DE DÉCOMPOSITION OU TRANSFORMATION PAR JOUR	Glucose 75 % Cellulose 2 % Bio.labile 33 % Bio.rés. 4 % Hum. labile 16 % Hum. rés. 0,6 % Nitrification de 50 à 2 kg ha <sup>4</sup> Dénitrification de 50 à 2 kg ha <sup>4</sup>	Carbohydrates et Protéines 80 % Cellulose et Hemicellulose 5 % Lignine 0,95 % Racines 0,5 % Humus 0,0083 % Dénitrification 0,006 % de N. nitrification	Dénitrification 3,5% de N. nitrification
CALIBRATION ET VALIDATION	Comparaison de la simulation avec les incubations pour NCSOIL, avec les cultures au champ pour NCSWAP.	En condition de déficit d'azote, ont été obtenues 37 simulations dans des sites différents donnant une bonne prédiction de la production de grains et de biomasse végétale totale et de l'extraction d'azote correspondante.	Prédictions satisfaisantes pour la production mais pas pour l'azote.
PARTICULARITÉS	Le plus complet pour l'azote dont les transferts sont déduits du C/N des compartiments concernés. Plus explicatif que prédictif il repose surtout sur des résultats d'incubation.	Bon instrument de prédiction de la production de maïs, il a été beaucoup utilisé et diffusé avec un logiciel bien documenté.	Seul modèle prenant en compte les propriétés physiques du sol, résistance à l'érosion et à la pénétration des racines.

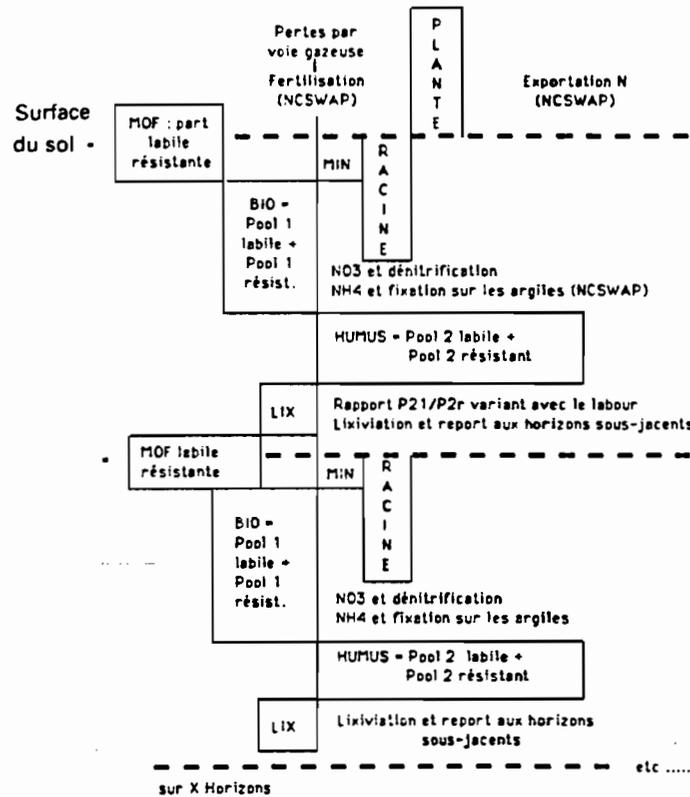


FIG. 2. - Schéma du modèle NCSOIL dans NCSWAP.  
 Design of NCSOIL model in NCSWAP.

Dans la compétition entre l'immobilisation de l'azote minéral par la plante et l'organisation microbienne dans le sol, la plante est alimentée en dernier.

Si une structure commune caractérise ces trois modèles, des différences apparaissent par suite de la spécialisation expérimentale des auteurs et/ou du choix de la hiérarchisation des facteurs testés. Elles sont analysées ci-dessous.

### 3. CARACTÈRES PARTICULIERS AUX TROIS MODÈLES CHOISIS

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des trois modèles étudiés.

#### 3.1. NCSOIL (fig. 2)

C'est le modèle le plus détaillé. Il est orienté vers l'organisation des connaissances au moins autant que vers d'éventuelles applications. Il constitue une partie d'un modèle plus vaste, NCSWAP, auquel renvoie le schéma de la figure 2 pour certaines entrées ou sorties.

Les utilisateurs de ce modèle seront contraints d'améliorer leurs connaissances sur la résistance des différents apports organiques à la biodégradation puisque, pour chacun d'eux, il oblige à considérer une partie labile et une partie résistante. Les rapports entre ces deux parties résultent de l'interprétation de courbes respirométriques obtenues au laboratoire et non de fractionnements.

NCSWAP considère d'une manière détaillée des processus tels que la rhizodéposition, la minéralisation des différents pools organiques et l'adsorption de l'azote ammoniacal par les argiles.

En outre, il combine les effets des variations des bilans hydriques avec le déroulement du cycle de l'azote.

Les valeurs proposées par NCSOIL pour la nitrification et la dénitrification correspondent à des résultats d'incubation transposés sur la base des 15 premiers cm de sol (soit 2 000 t/ha pour une densité apparente d'environ 1,3). Pour la dénitrification, les vitesses décroissent plus ou moins rapidement de la première

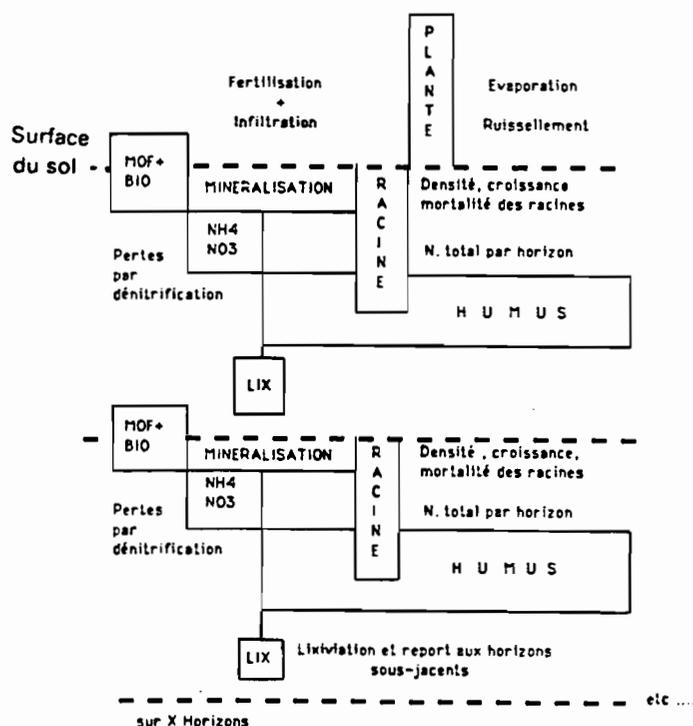


FIG. 3. – Schéma du modèle CERES.  
Design of CERES model.

à la deuxième valeur en fonction de la disponibilité en substrats carbonés. De plus, la dénitrification est supposée nulle jusqu'à ce que 60 % des pores soient remplis d'eau.

NCSOIL utilise 5 compartiments d'azote organique, dont la biomasse microbienne appelée Pool 1. Seul ce dernier compartiment fait l'objet de mesures de calibration. La création du terme "humads" ne correspond à aucune tentative de fractionnement des compartiments labiles et résistants. Leur existence est seulement déduite de l'allure des courbes de minéralisation du carbone du sol, obtenues à partir d'expériences d'incubation. De la même manière, les valeurs du rapport C/N des différents compartiments et les constantes de décomposition du carbone, résultent d'ajustements empiriques successifs sur des résultats d'incubation et de culture au champ. NCSWAP tient en outre compte du travail du sol pour modifier la dynamique de dégradation de l'humus, ici appelé Pool 2.

### 3.2. CERES (fig. 3)

CERES est centré sur la croissance génétiquement déterminée du maïs. C'est le seul modèle qui tienne compte du choix de l'hybride ou de la variété de maïs

pour calculer ses prévisions de production de matière sèche.

Pour cela, il est nécessaire de procéder avant toute chose à une observation minutieuse des paramètres phénologiques de la croissance de la variété de maïs à laquelle on prétend appliquer le modèle. Ceci doit se faire en conditions optimales à tous les points de vue. On suppose en effet que pour observer réellement le potentiel génétique de la variété choisie, on a éliminé tous les autres facteurs pouvant limiter son développement. Il faut également, et c'est encore plus difficile, chiffrer la densité, la croissance et la mortalité des racines.

Les processus édaphiques sont simplifiés au maximum. Il existe d'ailleurs une version du modèle qui ne prend en compte que l'infiltration de l'eau, du ruissellement et des données hydrodynamiques pour exprimer les seuls stress hydriques. Dans la version qui tient compte également de l'azote, la biomasse microbienne se confond avec la matière organique "fraîche" (litières et racines) qu'elle est en train de minéraliser et de transformer en humus.

Ces processus édaphiques se répètent d'horizon en horizon en fonction de la définition initiale du profil.

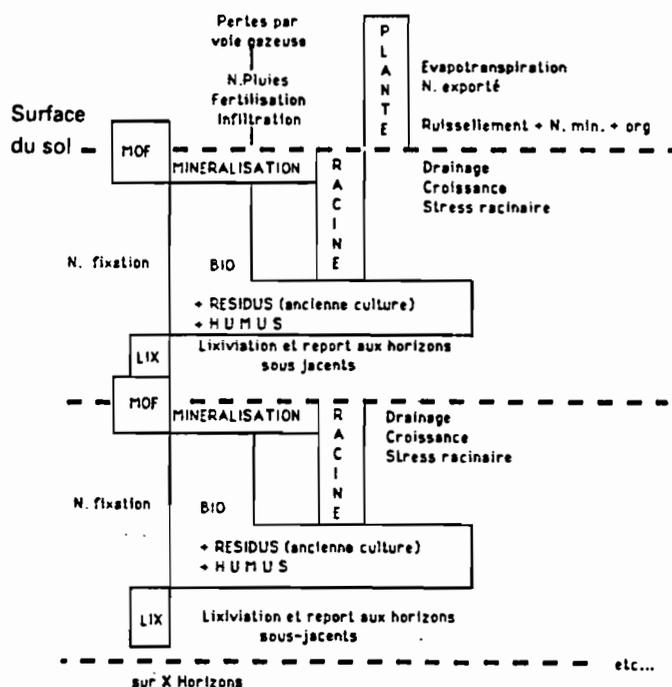


FIG. 4. - Schéma du modèle EPIC.  
Design of EPIC model.

### 3.3. EPIC (fig. 4)

EPIC peut être appliqué à n'importe quel type de culture.

Son intérêt principal est de prendre en compte les pertes d'azote non seulement sous forme minérale mais aussi sous forme organique par ruissellement superficiel. Il tient compte pour cela de la rugosité superficielle. Ceci pourrait s'avérer très important sous climat tropical. EPIC tient compte également de la densité apparente pour évaluer le drainage.

Le stress racinaire qui est évoqué dans le schéma de la figure 4, peut être non seulement un stress hydrique, mais aussi une résistance physique à la pénétration des racines, due par exemple à un tassement du sol ou à la formation d'une sole de labour.

Par contre, les processus d'organisation et de minéralisation de l'azote sont considérés de manière très globale. EPIC n'a en effet pas d'autre prétention que d'être un instrument de prévision des résultats de diverses récoltes et de gestion globale des sols utilisés en agriculture.

### 3.4. Comparaison des trois modèles

CERES et EPIC sont peu différents du point de vue du sol. Ils ont une source d'inspiration commune, PAPRAN (SELIGMAN et Van KEULEN, 1981) à la

quelle CERES ajoute le processus de nécrose des racines et EPIC celui des pertes d'azote organique par érosion.

Rappelons également que EPIC est le seul modèle qui prenne en compte non seulement l'azote mais aussi le phosphore comme éventuel facteur limitant le développement de la culture et la décomposition des résidus de récolte.

EPIC et CERES font reposer leur analyse de la dynamique de l'azote sur deux compartiments d'azote organique seulement :

- "matière organique fraîche" (ensemble hétéroclite des métabolites et des nécromasses issus des biomasses végétales et microbiennes) ;
- "humus" compartiment organique défini par différence.

Le fonctionnement de la simulation ne repose sur aucune explication du déroulement de la minéralisation de l'azote par rapport à celle du carbone.

Dans NCSOIL par contre, tous les constituants organiques du sol sont répartis en "labiles" et "résistants" en fonction de leur réaction à la dégradation biologique. Cette répartition ne repose pas sur un fractionnement de constituants organiques azotés mais seulement sur une interprétation des courbes respirométriques d'incubation.

Les constantes de vitesse de décomposition sont probablement les paramètres les plus difficiles à calibrer car ils sont impossibles à mesurer *in situ*. Tous les chiffres proposés dans le tableau I résultent donc de l'interprétation des courbes obtenues à partir d'incubations de substrats marqués isolés ou complexes. Ils sont donc tous plus ou moins différents car les compartiments considérés n'ont pas les mêmes limites et les données viennent d'expériences différentes.

En dehors des rendements de récolte et de mesures d'azote minéral dans le sol avant, pendant, et après la culture, le seul des trois modèles qui fasse appel à des expériences de calibration est NCSOIL pour lequel les incubations jouent un rôle fondamental.

De plus, NCSOIL se différencie nettement des deux autres modèles par l'utilisation systématique de l'azote  $^{15}$  comme traceur de la répartition de l'azote du fertilisant dans tous les compartiments du système. Cette utilisation peut donner l'occasion de calibrer de nombreux paramètres, car, à chaque transfert d'un compartiment à l'autre, on peut multiplier le flux supposé d'azote total par l'excès isotopique du compartiment de départ pour calculer celui du compartiment d'arrivée. De simples mesures d'excès pourront donc servir à confirmer ou infirmer les hypothèses correspondant aux paramètres choisis au départ.

#### 4. DISCUSSION

Dans le domaine des agro-systèmes, la modélisation peut sembler un engouement qui dérive plus du développement de la micro-informatique que d'une production scientifique nouvelle. En effet, les bases théoriques de la modélisation ont été codifiées depuis plus de vingt ans dans des domaines tels que le génie chimique ou la biologie. La représentation "compartimentale" des systèmes en biologie animale était facile à justifier par l'existence d'organes aux limites bien définies. La transposition de ces habitudes aux domaines des éco- et agro-systèmes est loin d'être évidente car elle oblige à s'écarter des définitions initiales et des règles scientifiques établies pour des systèmes où la modélisation "compartimentale" s'applique bien (DELFORGE, 1984).

A cause de ces difficultés théoriques non résolues, la position de beaucoup d'agronomes et de pédologues a été, et reste encore parfois, la méfiance vis-à-vis d'une activité perçue au mieux comme ludique ou au pis comme un gaspillage de temps et de crédits. Or, depuis dix ans, les réflexions plus ou moins critiques sur le processus de modélisation ne manquent pas et notre démarche tient compte en particulier de celles de VAN VEEN *et al.* (1981), TANJI (1982) et WHISLER *et al.* (1986). Une position critique a priori ne tiendrait

donc pas compte de tous ces efforts ainsi que des résultats des travaux effectués avec les traceurs isotopiques durant plus de vingt ans. Or, ces résultats trouvent actuellement leur expression la plus efficace dans la modélisation. Heureusement, il semblerait maintenant que soit passée la période des engouements et des rejets irrationnels et que soit venue celle des choix raisonnés et des orientations stables.

Que constatons-nous à partir de la caractérisation des modèles actuellement utilisés ?

Tous sont plus ou moins déterministes dans le sens où la création de compartiments dérive de la connaissance plus ou moins claire et détaillée de mécanismes chimiques ou biochimiques. Les auteurs ont dû se contenter le plus souvent de définir les compartiments en fonction de concepts assez généraux : ceci rend nécessairement leur contenu très hétérogène et leurs limites assez floues. Les analyses de sensibilité sont donc surtout globales. Elles ne font pas la différence entre les mécanismes les mieux connus et les plus faciles à contrôler expérimentalement, et ceux dont la définition et même l'existence restent des plus incertaines. De grands progrès restent à faire pour différencier les essais et les expériences de calibration en fonction de la précision des connaissances et des mesures. Par exemple, la volatilisation ou la nitrification sont bien connus et aisément chiffrables, ce qui n'est pas le cas de la plus ou moins grande "résistance" à la dégradation de telle ou telle catégorie de substances organiques présentes dans le sol.

A ce propos, les précurseurs de la modélisation en France (HÉNIN et DUPUIS, 1945) évitaient le problème en distinguant seulement un compartiment d'entrée (apport végétal) et un compartiment de stockage (humus). Par la suite, JENKINSON et RAYNER (1977) introduisaient une expression chiffrée de cette résistance à la dégradation du carbone puis de l'azote (JENKINSON et PARRY, 1989). Cette résistance est attribuée à des facteurs physiques ou chimiques. L'expression numérique de cette notion vague de résistance de la matière organique est faite sans que l'on soit sûr que la minéralisation de l'azote soit concomitante de celle du carbone. C'est pourquoi nous pensons que l'effort de recherche doit porter en priorité sur une représentation des échanges entre les diverses formes d'azote permettant des mesures et des expériences de calibration à réaliser. Dans un travail antérieur, l'un d'entre nous (S. HOUOT *et al.*, 1989) a pu vérifier par exemple que les courbes de production nette de carbone et d'azote minéral, proposées par le modèle, s'ajustent assez bien aux points expérimentaux obtenus par incubation. De telles expériences de calibration et de validation partielles doivent être multipliées. Elles offriront en général plus d'intérêt

que la création de nouveaux instruments de simulation.

Ceci permettra aussi d'éviter un faux débat sur les différents types de modèles. A ce propos, le mieux semble être de travailler à constituer des modules simples composés de compartiments identifiables et qui puissent éventuellement s'insérer dans des modèles plus vastes.

## CONCLUSION

La conclusion nous ramène à l'objectif principal du travail entrepris au Venezuela dans le cadre du projet SOMOS ULA-ORSTOM. Il s'agit d'élaborer un sous-modèle azote-sol tenant compte de l'expérience acquise.

Pour cela, l'utilisation de modèles existants est nécessaire pour que la mise au point de ce sous-modèle se fasse dans le contexte de l'utilisation d'un instrument de simulation global qu'il serait inutile de

vouloir refaire de toutes pièces. Un effort d'adaptation de ces instruments aux conditions des zones tropicales sera donc tout d'abord nécessaire.

L'idée principale qui guidera l'élaboration de ce sous-modèle sera de privilégier la biomasse microbienne et l'azote protéique des résidus de récolte et des substances humiques. En effet, ces fractions sont moins soumises aux aléas des variabilités temporelle et spatiale que l'azote minéral, compartiment de transition dont l'instabilité rend les analyses très difficiles à interpréter. Par contre, certaines fractions organiques sont aisément définissables par de petits laboratoires en contact direct avec les problèmes du développement agricole de nombreuses régions tropicales. Elles devraient donc avantageusement servir de base aux mesures de calibration et de validation des modèles de simulation des agro-systèmes.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 12 octobre 1990

## BIBLIOGRAPHIE

- BROADBENT (F.E.), 1986. – Empirical modeling of soil nitrogen mineralization. *Soil Science*, vol. 141, n° 3, 208-213.
- CLAY (D.E.), MOLINA (J.A.E.), CLAPP (C.E.), LINDEN (D.R.), 1985. – Nitrogen-Tillage-Residue Management : II. Calibration of potential rate of nitrification by model simulation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(2) : 322-325.
- DELFORGE (J.), 1984. – Sur l'identifiabilité et l'identification des modèles linéaires. Exemples d'applications dans le cadre de la théorie des systèmes de transformations. Thèse de doctorat ès sciences, université d'Angers, France, 388 pp. *multigr.*
- HÉNIN (S.) et DUPUIS (M.), 1945. – Essai de bilan de la Matière Organique du sol. *An. Agron.*, XV : 17-29.
- HOUOT (S.), MOLINA (J.A.E.), CHAUSSOD (R.) and CLAPP (C.E.), 1989. – Simulation by NCSOIL of net mineralization in soils from the "Dehéraïn" and "36 Parcelles" fields at Grignon. *Soil Science Soc. Am. J.*, vol. 53, n° 2 : 451-455.
- JENKINSON (D.S.) and PARRY (L.C.), 1989. – The nitrogen cycle in the Broadbalk wheat experiment : a model for the turnover of nitrogen through the soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 21, n° 4 : 535-541.
- JENKINSON (D.S.) and RAYNER (J.H.), 1977. – The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, vol. 123, n° 5 : 298-305.
- JONES (C.A.) and KINIRY (J.R.), 1986. – CERES-Maize : A simulation model of maize growth and development. Texas A & M University Press.
- PIERI (C.), 1985. – Les perspectives d'intensification de la productivité des terres dans les zones de savanes intertropicales. *C.R. Acad. Agr. Fr.*, 71 n° 10 : 1153-1168, séance du 30.10.85.
- SELIGMAN (N.G.) and VAN KEULEN (H.), 1981. – PAPPAN : a simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In : "Simulation of nitrogen behaviour of soil-plant systems". Frissel M.J. & Van Veen J.A. (eds) Pudoc Wageningen : 192-221.
- TANJI (K.K.), 1982. – Modeling of soil nitrogen cycle. In : "Nitrogen in agricultural soils". Stevenson J.F. (eds) Madison Wisconsin USA : 721-772.
- VAN VEEN (J.A.), Mc GILL (W.B.), HUNT (H.W.), FRISSEL (M.J.) and COLE (C.V.), 1981. – Simulation model of the terrestrial nitrogen cycles. In : "Terrestrial nitrogen cycles" *Ecol. Bull.* (Stockholm) 33 : 25-48.
- WHISLER (F.D.), ACOCK (B.), BAKER (D.N.), FYE (R.E.), HODGES (H.F.), LAMBERT (J.R.), LEMON (H.E.), Mc KINION (J.M.) and REDDY (V.R.), 1986. – Crop simulation models in agronomic systems. *Advances in Agronomy*, vol. 40 : 141-208.
- WILLIAMS (J.R.), JONES (C.A.) and DYKE (P.T.), 1984. – A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transaction of the ASAE* 27 : 129-144.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

**INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)**

**Nom du laboratoire :**

**SOMOS ULA-ORSTOM**

**Adresse :**

**Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA**

**HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.**

**SIMULATION MATHÉMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE I.2.**

**Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie**

**Mai 1993**

**Décision d'aide N° 89 L 0531**

## ANNEXE I.2. : LES CULTURES DE REFERENCE:

### Table des matières

#### 1. Expression du potentiel génétique de production de matière sèche et d'extraction de l'azote par la plante

##### 1.1. Objectifs

#### 2. Matériel et méthodes

##### 2.1. Le climat et le sol

##### 2.2. Les variétés de maïs

##### 2.3. Les conditions de culture

#### 3. RESULTATS

##### 3.1. Chronologie des Evénements phénologiques.

##### 3.2. Production de matière sèche totale.

##### 3.3. Vitesse d'accroissement du poids des grains

##### 3.4. Production à la récolte

##### 3.5. Extraction de l'azote

##### 3.6. Efficacité de l'utilisation de l'azote

#### 4. Discussion

#### 5. Conclusion

## 1. Expression du potentiel génétique de production de matière sèche et d'extraction de l'azote par la plante

### 1.1. Objectifs

L'objectif principal de l'expérience était d'obtenir les courbes de production potentielle de matière sèche et de grain et d'extraction d'azote en conditions optimales pour la variété étudiée, CENIAP PB8.

A cet objectif principal ont été ajoutés deux objectifs secondaires:

- Mode d'expression du potentiel génétique de production de matière sèche et d'extraction de l'azote du sol

- Evaluation de la translocation interne de l'azote au sein de la plante pendant la période de remplissage du grain.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1. Le climat et le sol

Le climat est celui des savanes néo-tropicales saisonnières (HETIER et al.1993) caractérisé par des températures moyennes mensuelles qui varient peu autour de la moyenne annuelle de 26°C mais deux saisons contrastées: une saison sèche de quatre mois pratiquement sans pluies (moins de 3% des précipitations entre décembre et mars) et une saison des pluies comportant parfois une petite période de sécheresse relative au mois de Juillet qui peut affecter les rendements du maïs si elle se produit au moment de la floraison femelle et de la pollinisation. La moyenne annuelle des précipitations des dix dernières années est voisine de 1600 mm et il ne se produit pratiquement jamais de déficit hydrique par rapport à l'Evapotranspiration Potentielle durant la saison des pluies.

Le sol utilisé est celui de la station expérimentale du Jardin Botanique de la UNELLEZ à BARINAS. Il s'agit d'un sol ferrugineux tropical lessivé (Kandic Paleustalf selon la dernière approximation de la classification de l'US Soil Survey).

Ses principales caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau II.1. Sol du Jardin Botanique (UNELLEZ, Barinas)

Prof. cm	Texture(%)			pH H <sub>2</sub> O	dens. gr/cm <sup>3</sup>	C. %	N %	CEC cmol(+) kg. <sup>-1</sup>	Sat %	Al cmol kg. <sup>-1</sup>
	Sab	Lim	Arg							
0-20	69	12	18	5.6	1.7	0.7	0,06	2,4	60	0
20-30	61	6	33	5.5	1.57	0.6	0,05	2,4	56	0
30-60	53	23	24	5.9	1.53	0.5	0,04	2,3	79	0
60-90	51	21	28	6.3	1.59	0.3	0,03	3,3	65	0
90-105	51	9	40	6.4	1.56	0.2	0,02	3,6	64	0

En général ce sol draine bien les précipitations mais à la saison des pluies il peut se saturer et sa conductivité hydraulique étant alors très faible on peut assister parfois à des épisodes de ruissellement violent qui peuvent durer 24 à 48 heures.

Par rapport aux autres profils représentatifs de la série Barinas, les taux de saturation en bases échangeables sont plutôt plus élevés que la normale, probablement à cause du chaulage initial effectué au moment de la mise en culture au début des années 1970 et qui a éliminé toute trace d'aluminium échangeable.

## 2.2. Les variétés de maïs

En vue de mieux définir par comparaison le comportement du PB8 que l'on voulait étudier, ont été choisies deux variétés dont les rendements sont supposés supérieurs et inférieurs.

L'hybride CENIAP PB8 est de port assez bas (entre 2 et 2,5 m) dont le rendement en conditions commerciales a été estimé à 5 T.ha<sup>-1</sup> (MARRERO 1987) Selon le même auteur, la variété MAQUINA de port plus variable et plus haut, serait également plus productive (plus de 6 T.ha<sup>-1</sup>) alors que celle de l'hybride DMR ne dépasserait guère 4 T.ha<sup>-1</sup>.

### 2.3. Les conditions de culture

Une fois préparé le terrain, éliminés les adventices par herbicide (Roundup 3l.ha ), brûlis, ratissage des résidus végétaux et trois passages de disques, les sous parcelles réservées aux trois variétés et aux deux doses d'azote et aux différents types d'observations et d'échantillonnage ont été matérialisées (3 répétitions pour les observations phénologiques et l'extraction de l'azote, 6 et 9 pour la translocation interne de l'azote)

L'apport initial de P et K a été effectué à la raie préalablement au semis à raison de 100 kg.ha<sup>-1</sup> P et K sous forme de superphosphate triple et de chlorure de potassium.

Le semis a ensuite été effectué manuellement en vue d'obtenir une densité de 40000 pieds ha<sup>-1</sup> après démariage, soit 4 pieds par mètre le long de raies espacées d'un m. On estime cet espacement suffisant pour éviter la concurrence entre les plantes et optimiser le rendement par pied.

Les deux doses d'azote (108 et 270 kg.ha<sup>-1</sup> Traitements n et N) ont été fractionnées en 9 apports sous forme de solution d'urée injectée au voisinage de chaque pied selon le calendrier suivant

Jours après semis :	0	14	28	35	42	49	56	63	70
% de la dose :	10	5	10	30	20	20	15	15	10

de façon à éviter toute limitation de nutrition azotée.

Le contrôle manuel et chimique des mauvaises herbes et des attaques parasitaires a permis de limiter au minimum les baisses de rendement attribuables aux compétiteurs ou aux parasites.

L'alimentation hydrique a été assurée de manière à ne pas limiter la croissance malgré des difficultés initiales (humectation préalable insuffisante) ou liées à l'alimentation du goutte à goutte ou des aspersoirs utilisés durant la culture. Les doses d'arrosage quotidiens (de l'ordre de 3 à 9 mm j.<sup>-1</sup>) étaient calculées de manière à maintenir une humidité de sol la plus constante possible en fonction de la consommation du maïs et du contrôle effectué par trois tubes de sonde à neutron et dix tensiomètres établis en bordure de parcelle.

Une dose convenable d'oligo-éléments a été également été apportée avec la première dose d'urée pour prévenir toute carence éventuelle.

Le déroulement de la culture et l'aspect des plantes semble assurer qu'elles n'ont effectivement souffert aucune limitation appréciable de leur développement.

### 3. RESULTATS

#### 3.1. Chronologie des Evénements phénologiques.

Le Tableau suivant présente, pour chaque variété, le nombre de jours écoulés entre le semis et les événements successifs, VE émergence, V6 apparition de la sixième feuille, R1 floraison féminine, R6 maturité physiologique.

TABLEAU 3.1. NOMBRE DE JOURS ECOULES ENTRE LE SEMIS ET LES EVENEMENTS PHENOLIQUES

VARIETE	EVENEMENT PHENOLOGIQUE							
	VE <sub>1</sub>	VE <sub>2</sub>	V6 <sub>1</sub>	V6 <sub>2</sub>	R1 <sub>1</sub>	R1 <sub>2</sub>	R6 <sub>1</sub>	R6 <sub>2</sub>
PB8	6 (6)	6 (5)*	21 (22)	21	58 (59)	59 (59)	111 (109)	111 (109)
MAQUINA	6	8	22	24	59	60	107	107
DMR	6 (5)	7 (6)	24 (22)	24	61 (59)	61 (60)	110 (109)	110 (109)

\*Entre les parenthèses figurent les résultats obtenus par MARRERO (1987) pour PB8 Y DMR à Maracay et qui sont très semblables bien que malgré la différence de climat et de sol.

Les indices 1 et 2 correspondent aux répétitions de mesure.

Il n'apparaît pas de différence significative entre les résultats obtenus en fonction des conditions de culture mais seulement des caractères génétiques de variétés.

#### 3.2. Production de matière sèche totale.

Les résultats sont exprimés en comparaison avec ceux de la culture effectuée l'année précédente en saison des pluies ce qui représente les conditions habituelles de croissance de la même variété sur le même sol.

La production de matière sèche obtenue par la culture optimisée est environ le double de ce que l'on obtient habituellement avec la même variété sur le même sol. Mais il est important de noter que ce supplément de matière sèche photosynthétisée profite uniquement au développement des parties vertes et ne se traduit pas par une augmentation de la production de grains. La limite génétique du potentiel de production de grain de cette variété paraît donc être atteint avant que soient réunies les conditions optimales de fertilisation et de contrôle phytosanitaire que nous avons essayé de réunir dans cet essai. <sup>1</sup>

Tableau 3.2. Comparaison de la matière sèche produite en 1988 et en 1989-1990

VARIETE	MATIERE SECHE (tm.ha-1)								
	R1(P.A.et grains)			R6(P.A.)			R6(Grains)		
	270	150	108	270	150	108	270	150	108
PB8 (1988)	5,8			6,8			5,8		
PB8 (1990)	3,55		4,5	7,5		4,7	5,6		5,2
D.S.	(0,4)		(0,5)	(1,9)		(1,7)	(0,7)		(0,8)
MAQUINA	3,48		2,64	2,56		2,40	3,36		2,28
D.S.	(11)		(6)	(2)		(14)	(10)		(6)
DMR	3,12		2,72	3,40		1,96	4,12		3,44
D.S.	(2)		(5)	(8)		(2)	(9)		(4)

1. Une autre observation plus qualitative peut confirmer ce résultat. Lors des diverses cultures de PB8 réalisées au cours des années précédant et suivant cet essai nous n'avons jamais en l'occasion de récolter des épis dont le poids dépasse beaucoup 150 g de grains. En supposant une semence idéale et uniforme et les meilleures conditions par ailleurs le rendement pourrait difficilement dépasser 8 T.ha-1. C'est donc plus par le développement de l'amélioration génétique que par l'optimisation des conditions de culture que passe l'augmentation des rendement du maïs au Venezuela.

### 3.3. Vitesse d'accroissement du poids des grains

Une fois établis les calendriers des événements phénologiques et les rendements en matière sèche et en grains on demande à la culture de référence de donner deux valeurs très importantes pour la simulation, l'accroissement du poids de grain et le nombre de grains par épis.

Tableau 3.3 ACCROISSEMENT DU POIDS DE GRAINS

Jours après le semis	VARIETE		
	PB8	MAQUINA mg.grain-1 (σ)	DMR
71	23 (21)	23 (14)	18 (13)
78	74 (38)	84 (28)	74 (28)
80	98 (36)	120 (32)	114 (31)
84	156 (45)	163 (28)	173 (31)
91	203 (55)	196 (69)	203 (30)
99	269 (60)	234 (43)	260 (36)
103	308 (31)	277 (50)	302 (43)
111	325 (40)	309 (68)	313 (42)

De cette première série de mesure on peut déduire une vitesse journalière de remplissage des grains tout au moins pendant la phase linéaire qui s'étend de approximativement de R1 à R6.

Tableau 3.4 Vitesse de remplissage des grains  
mg.grain-1.jour-1 (σ)

VARIETE	BARINAS (1990)	MARACAY(1987)
PB8	8	9
MAQUINA	5	---
DMR	7	9

### 3.4. Production à la récolte

Les valeurs mesurées à la récolte ont été les suivantes

- Nombre d'épis par plante
- Nombre de grains par épis
- Poids sec de grains par hectare

A titre d'exemple on donne dans le tableau suivant les valeurs obtenues pour la variété DMR et les deux doses d'engrais

TABLEAU 3.5 RENDEMENT EN GRAIN A LA RECOLTE FINALE

	PB8		MAQINA		DMR	
	N	n	N	n	N	n
N° d'épis par plante	1.08	1.05	1.10	1.07	1.17	0.95
N° de grains par épis	405	350	495	391	441	432
Production de grains (tm.ha-1)	4	3,7	3,6	3,6	3,3	3,4

### 3.5. Extraction de l'azote

La comparaison entre les résultats d'extraction de l'azote par la plante au cours de la culture révèle une fort supplément d'azote extrait au cours de la culture optimisée. Cette quantité d'azote supplémentaire est due non seulement à la plus grande quantité de matière sèche produite mais aussi aux concentrations d'azote plus élevées dans les tissus des plantes produites au cours de la culture irriguée.

Tableau 3.6 Comparaison de l'extraction de l'azote par le maïs aux cours des cultures de 1988 et de 1989-1990

VARIETE	AZOTE EXTRAIT (kg.ha-1)								
	R1(P.A.et grains)			R6(P.A.)			R6(Grains)		
	270	150	108	270	150	108	270	150	108
PB8 (1988)		80			41			97	
D.S.		(15)			(8)			(17)	
PB8	71		89	105		38	95		88
D.S.	(14)		(5)	(19)		(14)	(7)		(18)
MAQUINA	87		66	64		60	84		57
D.S.	(11)		(6)	(2)		(14)	(10)		(6)
DMR	78		68	85		49	103		86
D.S.	(2)		(5)	(8)		(2)	(9)		(4)

Pour mieux interpréter ces résultats, il faut rappeler que en 1988 la dose d'azote de 150 kg.ha-1 sous forme de perlurée a été ajoutée en une fois 25 jours après le semis. Dans ces conditions il est normal que les concentrations d'azote soient plus faibles que lorsqu'un apport plus faible accompagne tout le développement de la plante.

Bien que la quantité d'éléments nutritifs extraits durant cette période initiale soit très faible, la taille finale des feuilles épis et tiges dépendent en grande partie de la nutrition initiale durant les premiers jours de la vie de la plante.

### 3.6. Efficacité de l'utilisation de l'azote

L'efficacité d'utilisation de l'azote est un concept défini par le rapport entre la quantité de grains produits par la plante et la quantité d'azote disponible dans le sol (MOLL et al.1982). Cette efficacité dépend premièrement de l'extraction de l'azote par la plante et ensuite de la faculté de cette dernière de le concentrer dans le grain grâce au processus de translocation à partir des feuilles et des tiges. Pour utiliser correctement un tel concept, il faudrait d'abord s'appuyer sur une définition claire de l'azote disponible.

Comme la communauté scientifique est bien loin d'être d'accord sur cette notion, nous utiliserons ici une constante, à savoir l'azote du fertilisant en supposant que l'apport par le sol est potentiellement identique pour les deux doses d'urée. Cette approximation n'est pas non plus satisfaisante mais elle semble suffisante pour comparer les résultats obtenus en même temps sur le même sol.

On supposera en outre que:

- dans le cas de la forte dose d'azote (270 kg.ha<sup>-1</sup>) la plante extrait sans aucun stress tout l'azote correspondant à son potentiel génétique sur ce point.

- Dans le cas de la dose faible (108 kg.ha<sup>-1</sup>), et en l'absence de tout autre stress, la plante extrait autant d'azote qu'elle peut et l'accumule dans ses tissus pour ensuite le transférer aux grains.

Dans le Tableau 3.7. on pourra comparer l'efficacité des trois variétés étudiées pour absorber, accumuler et transférer l'azote.

TABLEAU 3.7 EXTRACTION DE L'AZOTE PAR LES TROIS VARIETES DE MAIS

VARIETE	AZOTE EXTRAIT (kg.ha <sup>-1</sup> )					
	R1(Plante)		R6(Parte aérea)		R6(Granos)	
	N*	n	N	n	N	n
PB8	71	89	105	88	95	88
σ	(14)	(5)	(19)	(14)	(7)	(18)
MAQUINA	87	68	64	59	84	57
σ	(11)	(6)	(2)	(14)	(10)	(6)
DMR	78	68	85	49	103	86
σ	(2)	(5)	(8)	(2)	(9)	(4)

N 360 kg.N ha<sup>-1</sup>

n 110 kg.N ha<sup>-1</sup>

σ Ecart type

Seule la variété Maquina extrait significativement moins d'azote que les deux autres.

Dans le tableau suivant on donne les éléments nécessaires au calcul de l'efficacité d'utilisation de l'azote par ces trois variétés.

**TABLEAU 3.8 EFFICACITE D'UTILISATION DE L'AZOTE**

	V A R I E T E					
	PB8		MAQUINA		DMR	
	N	n	N	n	N	n
Ns	360	108	360	108	360	108
Nt	200	175	149	116	188	135
Ng	95	88	84	57	103	86
Na	129	86	62	50	110	67
Na-Ng	34	-2	-22	-6	7	-20

Ng= N accumulé dans le grain en R6

Na= N accumulé par la plante entre R1 et R6  
calculé par différence

Nt= N accumulé par la plante à la maturité

Ns= Azote apporté

Pour qu'il soit nécessaire d'invoquer la translocation il faut que la quantité d'azote accumulée par la plante soit inférieure à l'azote du grain. Il est donc normal que la variété Maquina qui absorbe le moins soit aussi celle qui transfère le plus son azote aux grains pendant cette période. Le calcul de cet indice d'efficacité repose sur l'hypothèse implicite de l'accumulation prioritaire par le grain de l'azote absorbé par la plante pendant les soixante jours qui séparent R1 et R6. En fait seul le déficit d'azote oblige à invoquer la translocation d'azote pour assurer la croissance du grain. Lorsque ce déficit n'existe pas comme dans le cas du PB8, cela ne signifie pas qu'il n'y a aucun transfert mais seulement qu'il est impossible d'en faire la preuve.

Lorsqu'on dispose du traceur isotopique, on peut aller un peu plus loin dans le raisonnement. Si on considère les résultats de 1988 de ce point de vue on peut se rendre compte que la quantité d'azote augmente dans les grains durant les soixante derniers jours de 60 kg donc beaucoup plus que les 15 kg d'azote accumulé dans la plante pendant la même période. Il faut donc faire appel à la translocation dans ce cas, alors que ce n'est pas indispensable lorsque les apports d'azote sont fractionnés.

En outre on peut constater que l'azote dérivé du fertilisant n'augmentant pas dans la plante on peut en conclure que près de la moitié de l'azote accumulé dans le grain est dérivé du fertilisant et provient de la translocation et les 24 autres kg. dérivent du sol proviennent soit de l'absorption que continue soit de la translocation interne.

Un tel raisonnement suppose que les pertes sont nulles ou très faibles à partir des tiges et surtout des feuilles. Nous n'avons pas d'élément pour les chiffrer, mais on peut supposer qu'elles sont relativement faibles si l'on se base sur la faible baisse des CRU durant cette même période.

Nous avons cru bon de faire appel aux résultats de cette culture réalisée avant le démarrage du présent projet afin de mettre en évidence la nécessité de subordonner l'organisation des expériences de traçage isotopique aux questions que se pose obligatoirement le modélisateur lorsqu'il doit mettre en équation des phénomènes comme la translocation interne de l'azote. La comparaison avec la culture de 1988 fait ressortir au moins trois conclusions à ce point de vue:

- l'aptitude de chaque variété de maïs à mobiliser ses réserves en faveur du grain est à considérer en fonction des dates d'apport de l'azote
- le calcul classique de la translocation sous-estime largement l'amplitude réelle du phénomène
- le destin de l'azote dérivé de l'engrais n'est pas forcément identique du point de vue de la translocation de celui de l'azote dérivé du sol.

Cette dernière conclusion est liée au problème de la localisation dans la plante de l'azote prélevé par les racines actives au cours de la vie du maïs. D'après ces mêmes résultats, on peut constater qu'à la fin de la vie de la plante l'azote absorbé vient surtout du sol et non de l'engrais. Il serait intéressant de savoir si cela est dû au fait que la partie active des racines est à cette époque en dehors de la zone marquée ou si le phénomène est lié à l'immobilisation de l'azote dérivé de l'engrais sous des formes momentanément inutilisables par la plante. De telles études seraient très utiles pour améliorer dans les modèles la simulation de l'absorption de l'azote par les plantes et de son accumulation dans le sol.

#### 4. Discussion

Cette culture sert de point de départ à toute l'étude de sensibilité des modèles qui fait l'objet du deuxième paragraphe de la première partie du rapport principal.

Il est donc important de bien connaître les résultats et d'en discuter la portée avant d'entreprendre la lecture de ce paragraphe.

Le premier résultat est que tout le soin apporté à l'élimination des facteurs limitant habituellement la production de matière sèche et de grain a seulement permis d'augmenter le poids de feuilles et de tiges mais est pratiquement sans effet sur la production de grains.

A partir de 100 kg.N.ha<sup>-1</sup> on peut dire que le potentiel génétique de production de grain du PB8 est pratiquement atteint à 90%. A delà le rendement de l'engrais devient très faible et on arrive rapidement à une consommation de luxe qui se traduit par des concentrations d'azote anormalement élevées dans les tissus verts.

Au niveau agronomique, cette conclusion n'est pas originale. En ce qui concerne la modélisation des échanges sol-plante pour l'azote elle peut avoir des conséquences importantes.

Dans ces conditions, le potentiel d'extraction et de translocation de l'azote qui peut différencier les caractéristiques génétiques des variétés de maïs risque de ne pas apparaître et la qualité de la simulation va en être affectée.

De la même manière, nous avons certes évité que l'azote puisse constituer un facteur limitant au cours de la culture en fractionnant les apports d'urée mais de cette manière on risque de dissimuler certaines différences qui peuvent être importantes au niveau du développement de la biomasse racinaire.

## 5. Conclusions

La culture de référence doit donc être organisée avec une fertilisation qui permette d'éviter les facteurs limitants mais qui permette l'expression des aptitudes génétiques des variétés à valoriser au mieux les conditions de milieu et à utiliser le plus efficacement possible l'azote absorbé au profit de la production de grains.

En ce qui concerne la modélisation nous devons insister sur la nécessité de perfectionner les conditions de réalisation de la culture de référence dont les résultats vont ensuite conditionner toutes les conclusions que l'on va tirer de l'utilisation ultérieure du modèle. Les auteurs du modèle CERES ont fait un effort important pour exprimer de la manière la plus précise possible les différences génétiques entre variétés. Pour mettre à profit les perfectionnements de ce modèle par rapport aux autres instruments de simulation disponibles, il faut également que les conditions de réalisation de la culture de référence soient à la hauteur des exigences de l'instrument que l'on prétend utiliser.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHÉMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE 1.3.**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## ANNEXE 1.3. : Les mesures des caractéristiques hydriques

### Introduction

Les mesures de caractéristiques hydriques ont été effectuées à l'occasion de deux séminaires de formation à l'utilisation de la sonde à neutrons et de deux expériences organisées par C.MAYTIN durant les saisons sèches de 90 et 91. Ces derniers résultats ont fait l'objet de communications orales dans deux congrès locaux.(MAYTIN et al. 1991 a et b)

### 1. Valeurs nécessaires au fonctionnement du modèle EPIC

EPIC calcule les principales caractéristiques hydriques du sol, capacité au champ point de flétrissement et conductivité hydraulique, à partir des teneurs en Carbone organique, de la densité apparente et de la texture, détails que la documentation fournie ne signale pas. Ces données étant disponibles pour le sol de Barinas il était facile de faire un essai pour voir la différence entre les valeurs expérimentales et calculées.

HORIZON (m)	DENSITE (T/m <sup>3</sup> )	SABLE %	LIMON %	C %
0 - 0.2	1.52	69	12	0.7
0.3 - 0.6	1.52	53	23	0.5

H <sub>2</sub> O %	CC %	EX. %	H <sub>2</sub> O %	CC %	MO. %	H <sub>2</sub> O %	PF %	EX. %	H <sub>2</sub> O %	PF %	MO. %
26.0			26.3			15			14.9		
27.6			28.7			18			17.1		

CC: Capacité au champ  
 PF: Point de flétrissement  
 EX: Valeurs expérimentales  
 MO: Valeurs données par le modèle

Dans ce tableau on peut constater que dans le cas du modèle EPIC cette correspondance est assez bonne pour pouvoir considérer comme valables les approximations du modèle sur ce point. Nous avons décidé dans un premier temps de ne pas faire d'effort particulier sur ce point dans le cas de ce modèle.

### 2. Valeurs nécessaires au fonctionnement du modèle CERES

#### 2.1. La conductivité hydraulique par la méthode du drainage interne.

La conductivité hydraulique a été mesurée par deux fois à Barinas. Malgré des mesures de tensiométrie qui laissaient beaucoup à désirer, nous avons pu constater que la conductivité hydraulique de ce sol à saturation était très basse et varie très rapidement en fonction de l'humidité. La conductivité peut tomber de 10 mm.h-1 à 1 mm.h-1 lorsque l'humidité passe de 33 à 30 % puis à 0,1 mm.h-1 à 28 %. Ces faibles valeurs contrastent avec les vitesses d'infiltration rapides quand les horizons supérieurs relativement sableux sont secs. Durant la première heure le sol peut recevoir plus de 120 mm et près de 30 durant la deuxième.

Mais une fois qu'ils sont saturés et que l'eau arrive dans les horizons de profondeur argileux et compacts ces derniers seaturent rapidement. Le système devient alors quasi imperméable par rapport à l'eau qui pourrait encore arriver.

Cette mesure de conductivité nous a permis d'expliquer les inondations dont ont été victimes nos cultures en 1988 et surtout 1989. Après trois violentes averses consécutives de environ 50 mm le sol n'a pas pu absorber la quatrième qui a provoqué un ruissellement aussi violent qu'inhabituel dans cette zone de plateau surélevé. Nous avons là un autre exemple illustrant la nécessité de changer les hypothèses retenues par les auteurs des modèles qui n'ont pas eu à faire face à des précipitations aussi intenses tombant sur des sols de conductivité aussi faible.

## **2.2. Mesure au champ du point de flétrissement.**

Le modèle EPIC prend en compte les valeurs du point de flétrissement mesurées au laboratoire horizon par horizon pour déclencher la simulation d'un stress hydrique susceptible de freiner le développement de la plante. Le modèle CERES Maïs demande aux utilisateurs d'organiser in situ avec la variété étudiée, les conditions d'un stress hydrique irréversible afin de mesurer à ce moment là l'humidité réelle du sol.

Avant d'examiner les résultats rappelons tout d'abord que les cultures doivent être organisées en début de la saison sèche, de manière à ce que l'irrigation puisse être interrompue au moment où le risque de pluie accidentelle est minime c'est à dire au mois de février. La parcelle doit avoir une surface minimale de 100 m<sup>2</sup> une densité de 4 plantes par m<sup>2</sup> et les plantes doivent pousser normalement jusqu'à l'apparition du collet de la sixième feuille dans 50 % des plantes. A partir de ce moment l'irrigation est interrompue jusqu'à la dessiccation irréversible.

Les quelques mm de pluies qui sont tombés en février 90 ont empêché d'arriver à une dessiccation irréversible: un autre critère a du être recherché. L'arrêt de la circulation de la sève brute a pu être détecté à l'aide d'une impulsion thermique appliquée à la tige et dont la propagation est mesurée 15 mm plus haut à l'aide d'un thermocouple. L'humidité du sol a été mesurée lors de l'arrêt de l'ascension de la sève brute.

Les résultats obtenus figurent dans la première colonne des mesures faites au champ dans le tableau suivant.

Dans la deuxième colonne de limite inférieure mesurée au champ on trouvera les valeurs obtenues en février 91. Cette année là les précipitations ont été nulles pendant plus d'un mois et il a été possible d'obtenir la dessiccation irréversible.

**Tableau 2.1.**

Humidité volumique (%) dans le sol du Jardin botanique de la UNELLEZ à Barinas, Limite Inférieure (Li), Capacité au Champ (CC) et Saturation (SAT), calculé par le Modèle CERES-Maíz (cal) ou déterminés au champ ( en 90 ou 91).

Prof.*	Li-cal	Li-90	Li-91	CC-cal	CC-90	SAT-cal	SAT-90
0-20	11.6	15.0	7.5	23.0	27.0	32.9	41.2
20-30	18.3	20.8	9.9	29.4	31.6	34.1	39.0
30-60	14.3	20.5	15.0	26.2	34.7	34.7	36.4
60-90	16.1	23.5	20.0	32.6	33.7	34.9	37.7
90-105	21.3	23.0	16.7	33.6	36.0	34.5	40.1

Comme on peut le constater la première série de mesure donne des valeurs supérieures au calcul proposé par le modèle CERES qui a été calibré par les auteurs sur un type de sol tempéré non déterminé. La deuxième série de mesure effectuées en appliquant exactement les recommandations des auteurs de CERES donne des valeurs inférieures aux estimations du modèle. Dans les deux cas il faut recalibrer le modèle. En effet le modèle va simuler le stress hydrique soit trop tôt soit trop tard ce qui est aussi grave sinon plus que de mal calculer l'importance des réserves d'eau utile.

**Tableau 2.2. Calcul des réserves hydriques**

Prof.	Réserve utile			Eau libre	
	CERES	mes.90	mes.91	CERES	mes 90
0-20	11,4	12	19,5	10	14,2
20-30	11,1	10,8	21,7	4,7	7,4
30-60	11,9	14,2	19,7	8,5	1,7
60-90	16,5	10,2	13,7	2,3	4,0
90-105	12,3	13,0	19,3	0,9	4,1

\* Profondeurs en centimètres.

A partir des données du premier tableau nous avons calculé les réserves hydriques proposées par CERES et mesurées au champ afin de faire ressortir que les calculs du modèle n'introduisent pas tellement d'erreur sur les valeurs absolues des réserves d'eau libre mais sous-estiment largement l'eau utile ce qui explique la durée de stress hydriques simulés.

### 3. Discussion

Quelles pourraient être les conséquences de ce type de calcul mal calibré pour un éventuel utilisateur de l'instrument de simulation?

Au niveau de l'utilisation des modèles pour l'analyse du fonctionnement du système sol-plante, l'erreur sur la valeur absolue de la quantité d'eau utile va prolonger sensiblement la simulation.

Par contre l'erreur sur le moment auquel le sol atteindra 50% de la réserve d'eau utile peut avoir des conséquences tout à fait négatives sur la valeur de la simulation. Si le modèle anticipe sur la réalité il va surestimer le développement de la plante qui n'aura pas dans la réalité à sa disposition la quantité d'eau que suppose le modèle. Inversement le modèle risque de simuler un stress trop tôt alors qu'il ne se produit encore pas dans la réalité.

De la même manière le modèle va anticiper un épisode de ruissellement qui ne se produit pas encore ou qui ne se produira jamais si les pluies s'arrêtent à temps.

Dans tous ces cas de figure on voit qu'une estimation correcte des valeurs limites est aussi importante que celle des valeurs absolues des réserves d'eau utile.

Selon Delgado (1987), la principale raison de ces sous-estimations de l'eau utilisable viendrait du fait que l'algorithme utilisé a été calibré avec des sols relativement homogènes alors que les sols d'origine alluviale présentent des stratifications et des changements texturaux qui favorisent une rétention réelle d'eau dans le profil supérieure à une prévision uniquement basée sur la texture et la porosité.

Par ailleurs il faut également rappeler que les auteurs du modèle (JONES et KINIRY, 1986), avaient prévu que l'algorithme de CERES risquait de donner de mauvais résultats dans les sols tropicaux en raison de la nature différente des constituants minéraux et organiques. De fait, COMERMA (1989) a observé au Vénézuéla que si l'estimation des réserves hydriques de l'ensemble du profil est acceptable l'évaluation donnée pour chacun des horizons considéré individuellement ne l'est pas. En fin de compte le fonctionnement du modèle dépendra au moins autant de la situation des limites que de l'estimation des stocks.

Enfin, il faut signaler que CERES ne prend pas en compte les caractéristiques variétales au niveau de la capacité d'extraction de l'eau par les racines qui ne sont pas forcément identiques.

La situation actuelle de CERES au point de vue de la gestion des aspects hydriques de la simulation des échanges sol plante ne peut donc pas être considérée comme satisfaisante.

## Conclusion

Avant d'utiliser CERES en zone tropicale, il serait donc indispensable non seulement de faire la culture de référence que nous avons évoqué plus haut mais encore évaluer le bien fondé du fonctionnement de toute la partie hydrique avec la variété et le site choisis pour constituer un ensemble de données d'entrée qui puisse donner des résultats satisfaisants.

Avec une série de mesures supplémentaires nous serions probablement en mesure de proposer une modification de la calibration du modèle sur ce point. Mais ce serait probablement un travail inutile tant que l'on ne comprendra pas les facteurs qui font que le calibrage antérieur a pu être satisfaisant en zone tempérée et ne l'est pas en zone tropicale. Pour y parvenir il serait sans doute indispensable d'effectuer une étude de l'effet de la nature minéralogique de l'argile et des hydroxydes amorphes sur la rétention de l'eau dans les types de sols tropicaux que l'on veut utiliser pour la culture de maïs.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE I.4.**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## ANNEXE I.4. : ANALYSES DE SENSIBILITE : PARTIES AERIENNES

Table des matières

### INTRODUCTION

#### 1. LISTE DES DONNEES D'ENTREE UTILISEES

- 1.1. Données climatiques
- 1.2. Données sur la partie aérienne
- 1.3. Données sur les racines
- 1.4. Données édaphiques
- 1.5. Données sur les pratiques culturales

#### CONCLUSIONS SUR LES DONNEES D'ENTREE

#### 2. ANALYSES DE SENSIBILITE AUX VARIATIONS DES DONNEES D'ENTREE.

##### 2.1. Comparaison des données d'entrée concernant les parties aériennes.

###### 2.1.1. Le modèle CERES

###### 2.1.2. Les modèles EPIC et NCSWAP

##### 2.2. Algorithmes qui définissent le développement et la croissance de la plante

##### 2.3. Conclusion sur la simulation des parties aériennes proposée par les trois modèles

#### 3. Production et récolction de données utilisées dans les analyses de sensibilité.

##### 3.1. Les cultures de référence

##### 3.2. Les données issues de la bibliographie ou assumées comme ordre de grandeur acceptable

##### 3.3. Résultats des Analyses de sensibilité des données liées à la production de matière sèche et de grain

###### 3.3.1. CERES

###### 3.3.2. EPIC

###### 3.3.3. NCSWAP

###### 3.3.4. Comparaison des trois modèles en ce qui concerne la production de matière sèche et de grains

#### 4. Discussion sur la méthode employée

### CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

Pour pouvoir être facilement calibrés et validés, les modèles doivent pouvoir fonctionner à partir de données qui soient à la fois fiables et relativement faciles à obtenir.

Nous n'avons encore trouvé aucune publication ayant pour objectif d'étudier systématiquement l'effet de l'incertitude inévitable sur l'estimation de ces données d'entrée sur les résultats des simulations de croissance et de production. En effet, ces modèles tentent de représenter la relation entre croissance et production des cultures, l'énergie reçue (radiation et température) et les éventuels facteurs limitants qui sont en zone tropicale surtout l'eau et les éléments nutritifs. Pour ce faire, ils utilisent un grand nombre de données parfois difficiles à mesurer accompagnées d'erreurs variables et trop souvent estimées plus ou moins arbitrairement. Il serait bon de pouvoir d'accompagner chacune d'entre elles d'une marge d'erreur. Ce pourrait même constituer une manière de les classer et de décider de l'importance à leur donner au moment de construire ou de modifier les modèles.

Mais l'expérience acquise au cours des trois années de travaux menés à bien dans le cadre de ce contrat nous a montré les limites étroites entre lesquelles une équipe réduite et inexpérimentée peut progresser. Non seulement il n'est pas possible d'envisager sérieusement de construire un modèle nouveau mais il est beaucoup plus difficile qu'il n'y paraît d'y apporter des améliorations. En effet le choix initial qui a été fait d'améliorer la partie azote des modèles existants suppose une connaissance de l'ensemble qui soit à la fois globale et complète mais aussi très détaillée. Le jeu des interactions est très complexe et il faut certainement beaucoup de temps pour les dominer véritablement. De toute façon la prise de conscience de cette complexité passe par des débuts difficiles et inévitables qui consistent à lire les programmes ligne par ligne pour y retrouver la démarche intellectuelle de leurs auteurs.

Tout d'abord la lecture même des modèles est un exercice ingrat pour deux raisons principales. La première est que la documentation, quand elle existe est toujours trop succincte et beaucoup de décisions matérialisées dans le programme ne sont pas justifiées. C'est en partie pour cela que ce travail a été entrepris de cette manière. L'autre raison est se sont sédimentés dans les programmes une foule de résidus correspondant aux tâtonnements des auteurs qui n'ont pas jugés utile d'éliminer les parties rejetées en commentaires.

Face à cette situation, soit il faut se rendre chez les auteurs et s'intégrer à leur équipe si c'est possible, soit il faut s'armer de beaucoup de patience et tout déchiffrer jusqu'à ce que tout soit clair. L'expérience montre que c'est possible mais il faut disposer de beaucoup de temps et de personnel qualifié et infatigable. C'est pourquoi ce que nous allons exposer dans les deux annexes consacrées aux analyses de sensibilité est d'une part entaché de certaines imperfections mais surtout est incomplet.

M.ZUVIA a cependant tout le mérite d'avoir entrepris cette tâche et de l'avoir mené aussi loin qu'elle a pu dans les limites d'un temps limité par la durée de la bourse de thèse accordée par l'ORSTOM et par les parties expérimentales de sa thèse qu'il fallait également mener à bien. Cette première étape est probablement la plus longue et la plus ingrate car elle ne permet pas de conclure et de prendre les décisions nécessaires à la construction d'un instrument de simulation amélioré. Mais elle est probablement inévitable. Nous présentons donc ici cette première étape d'un processus d'analyse et de reconstruction qui se poursuit actuellement grâce à D.CARDON dans le cadre du financement accordé par la CEE.

Très classiquement cette première étape a consisté à utiliser la production de parties aériennes et de grain comme sorties à observer en fonction de la variation des données d'entrée. Ce choix présente surtout l'avantage pratique de reposer sur des mesures faciles d'accès pour l'expérimentateur. Mais cela ne veut pas dire qu'elles soient nécessairement les plus pertinentes pour toutes les données à tester. Ce sera dans l'étape actuelle que nous pourrons essayer de mieux sélectionner les sorties à utiliser pour tester l'efficacité du modèle en fonction de telle ou telle donnée d'entrée ou de tel ou tel paramètre.

A ce point de vue, les parties aériennes de la plante présentent l'avantage d'intégrer le résultat des multiples interactions sol-plante-climat tout en étant faciles d'accès pour l'expérimentateur. C'est pourquoi nous leur donnerons la priorité dans les études de sensibilité. Mais avant de comparer comment les trois modèles tirent parti des données concernant les parties aériennes, nous croyons utile de rappeler ici (c.f. Rapport d'avancement N°1 de 1991) pour chacun des modèles, la liste des données qu'ils utilisent et la manière dont nous avons pu les obtenir pour effectuer les essais de sensibilité.

Après avoir rendu compte des essais effectués, des données obtenues et de l'effet de leurs variations sur les résultats de simulation, nous concluons en proposant quelle pourrait être la marche à suivre pour étudier l'effet de ces données non plus isolément mais en fonction de la structure des relations qui conditionne leurs interactions.

## 1. LISTE DES DONNEES D'ENTREE UTILISEES

### 1.1. Données climatiques

La plupart des modèles utilisent des données journalières les plus courantes. Il est même possible que cette raison pratique soit à l'origine du pas de temps journalier qu'utilisent la majorité des modèles examinés. Les trois modèles peuvent utiliser un pas de temps d'un jour et de plus NCSWAP utilise un pas de temps variable pour s'adapter aux entrées d'eau dans le système. Les données climatiques nécessaires à chaque modèle sont reportées dans le Tableau A 14.1.

TABLEAU A 14.1 DONNEES CLIMATIQUES

MODELE	DONNEE	PAS DE TEMPS	MODE D'OBTENTION
CERES, EPIC, NCSWAP	T maxima	journal.	station climatologique des FAV* à 8 Km de la UNELLEZ
	T minima	journal.	
	précipitation	journal.	
CERES, EPIC	radiation solaire	journal.	station climatologique de FAV* à 8 Km de la UNELLEZ
CERES, EPIC	latitude		
EPIC	humidité relative et vitesse du vent	journal.	Evaporation potentielle calculée à partir de la radiation et de la température grâce à l'équation de Priestley-Taylor Ces données n'ont donc pas été prises en considération
		journal.	
NCSWAP	évaporation de bac type A	hebdo.	station climatologique de FAV* à 8 Km de la UNELLEZ

\* Forces Aériennes Vénézuéliennes

## Commentaires du Tableau A 14.1 : Données climatiques

La lecture de ce tableau démontre qu'il suffit de disposer des données classiquement fournies par une station météorologique simplifiée, pour pouvoir faire fonctionner les modèles.

Les différences entre les trois modèles concernent surtout la manière de calculer l'évaporation potentielle. NCSWAP la calcule en utilisant les valeurs hebdomadaires d'un bac type A. EPIC propose une option de calcul où intervient l'humidité relative et la vitesse du vent réellement mesurés dans la station. Si ces données ne sont pas disponibles, s'y substitue le calcul proposé par l'équation de Priestley-Taylor qui utilise seulement la radiation solaire et la température.

Dans le cas de NCSWAP, l'entrée d'eau comprend à la fois les précipitations et, éventuellement, l'irrigation journalières. Mais le modèle demande également la durée de la phase d'entrée d'eau et la concentration en azote.

Pour CERES et EPIC, l'importance des données de radiation solaire, vient du fait qu'il servent au calcul de la production de matière sèche et de l'évaporation potentielle. Par contre, NCSWAP calcule la production de matière sèche à partir d'une fonction de croissance journalière optimale préétablie en supposant que la radiation n'est jamais limitante. Ce dernier modèle présente en outre l'avantage de n'exiger que des données climatiques faciles à obtenir surtout en zone tropicales où les stations climatiques de classe A sont plus ou moins déficientes.

Signalons enfin que EPIC est doté d'un système de création automatique de données climatiques journalières à partir de données moyennes mensuelles et de leurs écarts types. De même le modèle CERES, dans la mesure où il est intégré dans un système de préparation des données appelé DSSAT, (Decision Support System for Agrotechnology développé par le Réseau appelé International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer), peut, entre autres choses, générer un ensemble de données climatiques journalières à partir des données climatiques d'une période d'au moins cinq ans. Dans le cas où il n'utilise pas les températures du fichier météo, NCSWAP peut recourir également à un fichier historique de données climatiques.

### 1.2. Données sur la partie aérienne

La culture réalisée de décembre 89 à avril 90, a été organisée en vue d'obtenir le plus possible des données "plante" nécessaires aux modèles étudiés. Pour le modèle CERES, les observations sont simples et ont pu être faites sur les trois variétés. Pour EPIC et NCSWAP, elles ont été déterminées sur une variété seulement.

Avant d'aborder la lecture du tableau A 14 2 concernant les parties aériennes il nous a paru nécessaire de faire quelques rappels sur la nature de ces données et leur utilisation par les trois modèles étudiés.

La vitesse de production de matière sèche est seulement fonction du rayonnement solaire et de la température en supposant une fourniture optimale d'eau et d'éléments nutritifs. Cette vitesse suit une courbe dont l'allure correspond aux caractéristiques génétiques de la plante. Cette vitesse observée dans ces conditions optimales s'appellera

vitesse potentielle de croissance. Les données afférentes à cette vitesse potentielle de croissance vont dépendre pour chaque modèle de la fonction ou de l'algorithme utilisé par le modèle pour exprimer la production de matière sèche.

Le modèle CERES-MAIZE utilise des coefficients qui expriment de manière synthétique comment la variété étudiée rythme ses étapes phénologiques en réponse à l'action des facteurs de l'environnement, principalement de la température mais aussi de la photopériode et de l'humidité au moment de la germination.

EPIC se base sur la proposition de MONTEITH (1977) pour calculer l'augmentation journalière de la biomasse. Le développement phénologique est basé sur l'accumulation journalière des "heat unit" c'est à dire des degrés-jours.

NCSWAP utilise simplement la production potentielle de biomasse aérienne totale et de grains et une équation de la courbe de croissance relative donnant le poids total de biomasse aérienne et de grain. L'équation utilisée est la suivante:

$$G = A1 / (1 - \exp(A2 + A3 * t + A4 * t^2 + A5 * t^3))$$

où: G est "le poids relatif"

t, le nombre de jours de culture ou degrés-jours

A1, A2, A3, A4, A5, les coefficients de la courbe

de croissance relative obtenue par ajustement aux

données expérimentales.

Pour que le lecteur puisse évaluer facilement la proportion de données qui sont assumées sans faire l'objet d'aucune mesure nous les avons signalées par une astérisque \*. C'est à ces données, lorsqu'elles ne peuvent pas être remplacées par des mesures simples, que seront appliquées en priorité les analyses de sensibilité.

TABLEAU A 14.2. Données concernant la Plante

MODELE	DONNEES	MODE D' OBTENTION
CERES	degrés-jours entre l' émergence et l' apparition de la feuille N° 6	observation directe non destructive
CERES	degrés-jours entre la floraison féminine et la maturité physiologique	observation directe non destructive
* CERES	sensibilité photopériodique	valeur trouvée dans la documentation de CERES pour un maïs tropical
CERES	nombre potentiel de grains par plante	observation directe destructive



* NCSWAP	fraction de l' évapotranspiration potentielle correspondant à l'évaporation sous couvert intégral.	estimation d'après les données de ORDAZ (1986) et l'algorithme de CERES pour calculer l'évaporation du sol.
NCSWAP	jours ou degrés-jours entre l' émergence et la pollinisation	observation non destructive
NCSWAP	j. ou degrés-jours entre émergence et la maturité physiol.	observation non destructive
NCSWAP	jours ou degrés-jours avant le début de la sénescence	observation non destructive
* NCSWAP	nombre de jours après l'émergence durant lesquels la T° du sol contrôle la croissance	on a considéré que la température de l'air contrôlait la croissance depuis l'émergence
NCSWAP	production potentielle de matière sèche totale	échantillonnage
NCSWAP	production pot. de grains	échantillonnage
NCSWAP	coefficients de la courbe de croissance en fonction de la matière sèche totale	échantillonnage
NCSWAP	coefficients de la courbe de croissance en fonction du poids sec de grain	échantillonnage
* NCSWAP	pourcentage de Carbone de la matière sèche	on a assumé une valeur moyenne de 40 %
NCSWAP	pourcentage d'azote dans la partie aérienne	8 points d'échantillonnage pour le laboratoire

### 1.3. Données sur les racines

Les caractéristiques du développement des racines ont un effet important sur la simulation des processus impliqués dans le flux des éléments nutritifs du sol vers la plante. Cependant à part NCSWAP, les données "racines" demandées par les modèles sont peu nombreuses.

Les expériences n'ont pas été effectuées. Elles consistent en une observation sur sol et en une observation sur plaque de plexiglass transverse pendant la croissance. Durant la période décembre 89-avril 89, nous avons fait des hypothèses plus ou moins

TABLEAU A 14.3. Données

MODELE	DONNEES
* CERES	distribution des racines par
* EPIC	profondeur des racines
* NCSWAP	profondeur de l'émergence
* NCSWAP	rapport des racines à l'émergence
* NCSWAP	pende de la racine en fonction
* NCSWAP	nombre de racines émergentes durant la croissance racinaire
* NCSWAP	nécrose quoté racines
* NCSWAP	nombre de racines émergentes à par la vitesse de croissance des racines
* NCSWAP	première vitesse de croissance des racines
* NCSWAP	seconde vitesse de croissance des racines

* NCSWAP	nombre de phases de croissance des racines	FOTH (1962)
* NCSWAP	fraction du poids des racines se trouvant à une profondeur donnée au début de chaque phase de croissance des racines	FOTH (1962)
* NCSWAP	évolution du rapport N Racines/ N Part.aériennes durant la culture	valeur constante assumée à partir des données de CHEVALLIER et SCHRADER (1977)

#### 1.4. Données édaphiques

Une fois connu le potentiel génétique et les conditions climatiques, la croissance de la plante va dépendre des caractéristiques biologiques et physico-chimiques du sol qui vont à leur tour déterminer l'absorption racinaire des éléments nutritifs et de l'eau nécessaires à la plante. L'utilisation des trois modèles étudiés ici repose sur une série de données plus ou moins complexe, la plus détaillée en ce qui concerne l'azote étant celle que propose NCSWAP (Tableau A 14.4).

TABLEAU A 14.4. Données édaphiques.

MODELE	DONNEES	MODE D' OBTENTION
CERES, EPIC, NCSWAP	profondeur de la limite inférieure de chaque horizon du profil ou épaisseur de chaque horizon	description du profil du sol du Jardin Botanique de la UNELLEZ (HETIER et al 1989)
CERES, EPIC, NCSWAP	densité apparente sèche et capacité au champ par horizon	mesure par gammadensimétrie (ACEVEDO y MAYTIN 1990)
CERES, EPIC, NCSWAP	teneur en eau des horizons du sol au point de flétrissement	mesures in situ par humidimétrie neutronique, circulation de sève par pulse thermique et potentiel des feuilles par pompe de Scholander (MAYTIN et al 1991)
CERES, EPIC, NCSWAP	teneur en eau des horizons du sol à la capacité au champ	mesures in situ par humidimétrie neutronique (ACEVEDO et MAYTIN 1990)

CERES, EPIC, NCSWAP	teneur en eau des horizons du sol au début de la culture	observation par humidimétrie neutronique (MAYTIN et al 1991)
CERES, EPIC, NCSWAP	N-NO3 initial du sol par horizon	laboratoire
* CERES, EPIC, NCSWAP	résidus de culture	par défaut CERES suppose la présence de 500 kg.ha-1 de racines provenant de la culture antérieure. CERES et EPIC ont fonctionné avec des valeurs estimées en kg.ha-1 et NCSWAP par m2
CERES, EPIC, NCSWAP	température du sol	l'algorithme de CERES et EPIC calcule la T° du sol à partir de la T° moyenne annuelle et de l'amplitude moyenne mensuelle, NCSWAP utilise la T° moyenne hebdomadaire par horizon
* CERES, EPIC	albedo du sol	estimé à partir du tableau 3.1. p 38 de RITCHIE et al 1986
CERES, EPIC	pH du sol par horizon	détermination au laboratoire (HETIER et al 1989)
CERES, EPIC	concentration de C organique par horizon	détermination au laboratoire (HETIER et al 1989)
* CERES, EPIC	type de courbe de ruissellement superficiel	selon la table proposée par le Service de Conservation des Sols (USA) en fonction du groupe hydrologique
CERES, NCSWAP	N-NH4 initial du sol par horizon	détermination au laboratoire
CERES, NCSWAP	teneur en eau des horizons du sol à la saturation	mesure par humidimétrie neutronique (ACEVEDO et MAYTIN 1990)
* CERES, NCSWAP	drainage du profil	CERES classe les sols par un paramètre variant de 0,1 à 0,9 selon la perméabilité de l'horizon le moins poreux. NCSWAP fait de même à l'aide d'un code

* CERES, NCSWAP	évaporation du sol	CERES demande un coefficient correspondant au maximum d'évaporation du sol estimé entre 6 et 12 mm par jour selon la texture (RITCHIE 1972), NCSWAP demande le nombre d'horizons à partir desquels l'eau s'évapore.
EPIC, NCSWAP	% de sable et de limons par horizon ou code de texture pour NCSWAP	détermination de laboratoire (HETIER et al 1989)
EPIC, NCSWAP	conductivité hydraulique à saturation par horizon	mesure par la méthode du drainage interne (ACEVEDO y MAYTIN 1990)
* EPIC, NCSWAP	profondeur des dépressions superficielles du sol	valeur estimée à vue
EPIC, NCSWAP	niveau de la nappe phréatique	à cet endroit le profil n'est pas affecté par la nappe
CERES	constante de vitesse minéralisation de l'humus	selon une série de valeurs types que propose CERES pour une série de sols
EPIC	présence de CO <sub>3</sub> Ca	détermination de laboratoire
EPIC	N organique du sol par horizon	détermination de laboratoire (HETIER et al 1989)
EPIC	autres données sol: S, CEC, pierrosité temps de flux interne P labile et rapport d'adsorption P org.	données non utilisées comme le permet le programme.
* NCSWAP	N biomasse microbienne (pool I, labile et résistant) par horizon	N biomasse total a été déterminé par fumigation-extraction dans l'horizon 0-20 (CHAUSSOD 1988) Sa composante labile est estimée à 56 % selon HOOOT et al (1989), Pour les autres horizons on assume que N biomasse est proportionnel à N organique de l'horizon
* NCSWAP	C/N du pool I par horizon	la valeur déterminée par CHAUSSOD (1988), a été appliquée à tous les horizons

* NCSWAP	N organique actif (humads = pool II, labile et résistant) par horizon	Fraction labile: une partie de N hydrolysable non distillable. Le reste, en général équivalent à la quantité de N hydrolysable distillable, appartient à la fraction résistante. (EGOUMENIDES 1990) Les proportions trouvées en 0-20, ont été appliquées dans les horizons suivants en fonction du N total.
* NCSWAP	C/N de pool II par horizon	selon valeur proposée par HOUOT et al 1989, pour tous les horizons
* NCSWAP	rapport N-NH <sub>4</sub> soluble dans l'eau à N-NH <sub>4</sub> soluble + N échangeable	valeur 1 arbitraire car en réalité cette valeur change trop vite
* NCSWAP	vitesse de nitrification journalière	valeurs mesurées en 1980, pour un sol de la Série Barinas, (CARILLO 1980)
* NCSWAP	humidité pour laquelle nitrification et dénitrification peuvent se produire simultanément	valeurs trouvées dans un exemple accompagnant le programme NCSWAP
* NCSWAP	fraction de la nitrification et de la dénitrification potentielle fonctionnant quand elles sont simultanées	valeurs trouvées dans un exemple accompagnant le programme NCSWAP
* NCSWAP	carbone nécessaire pour la dénitrification par unité de N dénitrifié à saturation	valeurs trouvées dans un exemple accompagnant le programme NCSWAP
* NCSWAP	Pouvoir réducteur de la solution du sol	programme NCSWAP
* NCSWAP	Succion du front humide	valeur par défaut proposée par le modèle.

La lecture de ce tableau démontre que les données sol sont nombreuses; certaines d'entre elles sont difficiles et coûteuses à obtenir. De plus, la plupart sont sujettes à une variabilité spatiale importante due à la zone d'influence de la mesure ou à la taille de l'échantillon qui peut difficilement représenter correctement un milieu toujours hétérogène. Le tableau permet également de se rendre compte qu'une proportion importante de ces données sont estimées de manière plus ou moins arbitraire en général par ce que l'on ne sait ou ne peut pas les mesurer.

Par exemple, pour déterminer la température du sol que demande éventuellement NCSWAP, nous avons utilisé un algorithme proposé par CERES après l'avoir traduit en TurboPascal. Comme EPIC nécessite des données permettant un calcul des pertes par érosion nous avons du, faute de pouvoir effectuer les mesures appropriées, estimer que dans notre cas ces pertes étaient nulles. Une telle approximation est valable dans le cas de Barinas lorsqu'il ne se produisent pas les épisodes de ruissellement que nous avons évoqué à propos des propriétés hydriques du sol.

### 1.5. Données sur les pratiques culturales

**TABLEAU A 14.5. Données sur les pratiques culturales**

MODELE	DONNEES	MODE D' OBTENTION
CERES, EPIC, NCSWAP	date et profondeur de semis	notes de culture
CERES, EPIC, NCSWAP	densité de plantation	notes de culture
CERES, EPIC, NCSWAP	irrigation: date, quantité et durée	notes de culture, durée parfois seulement estimée
CERES, EPIC, NCSWAP	Fert. N: date, quantité, profondeur d'application type de fertilisant	notes de culture, la profondeur estimée vu qu'il a été appliqué en solution.
CERES, EPIC	latitude	station climatologique
EPIC, NCSWAP	labour	Le point de départ de la simulation se situe après la première préparation du sol. (il peut y en avoir 10)
EPIC, NCSWAP	date de récolte	notes de culture
EPIC, NCSWAP	drainage artificiel	pas nécessaire
EPIC	nombre d'années de culture avant l'expérience actuelle	histoire du Jardin Botanique de la UNELLEZ
EPIC	Fert. P: date, quantité, profondeur, type	notes de culture, profondeur estimée à vue
EPIC	chaulage	non pratiqué
EPIC	Indice de tolérance à l'Al	Pas d'Al échangeable à Barinas
NCSWAP	fertilisation organique	non pratiqué

Les données concernant les données culturales sont les plus faciles à trouver dans la bibliographie car elles sont généralement bien reportées par les expérimentateurs.

## CONCLUSION SUR LES DONNEES D'ENTREE

Si on observe les Tableaux A14 1, 2, 3, 4 et 5, on peut constater que dans le cas de la première tentative de simulation de la culture de Barinas (décembre 89-avril 90) avec le modèle CERES, approximativement 70 % des données demandées ont pu être effectivement mesurées, alors que, avec le modèle EPIC, cette proportion tombe à 60 %, et avec le modèle NCSWAP à 40 %. Rappelons que CERES et NCSWAP constituent les deux extrêmes des différents modèles d'agro-systèmes. En tant que modèles compartimentaux les deux sont des modèles mécanistes ou déterministes par opposition aux modèles statistiques ou empiriques qui n'ont pour but que de prévoir des résultats expérimentaux sans prétendre simuler des mécanismes. Cependant CERES est surtout un modèle fonctionnel et, comme tel, prétend atteindre ses objectifs avec un minimum de données de entrée, alors que NCSWAP est un modèle délibérément mécaniste utilisé comme instrument de recherche pour mieux comprendre les systèmes intégrant le système sol-eau-plante. Pour cette raison, il est plus complexe et demande plus de données d'entrée (ADDISCOT et WANEGET 1985).

### 2. ANALYSES DE SENSIBILITE AUX VARIATIONS DES DONNEES D'ENTREE.

Pour pouvoir présenter les résultats obtenus, il est indispensable de rappeler d'abord sous une forme un peu différente que précédemment, quelles sont les données nécessaires à l'utilisation des trois modèles, puis décrire les algorithmes qui servent à simuler le développement de la plante et enfin présenter les marges de variation utilisées pour les 16 données utilisées dans cette série d'analyses de sensibilité.

#### 2.1. Comparaison des données d'entrée concernant les parties aériennes.

Dans le tableau A 14.1. on a repris les données qui servent à définir le potentiel de production de biomasse végétale. Les données concernant les racines ne sont pas reproduites car elles sont mentionnées dans le tableau A 14 3. du paragraphe précédent. Le but de ce tableau est de faire ressortir la différence entre les exigences des trois modèles. CERES n'exige que six données concernant la partie aérienne de la culture, EPIC 14 et NCSWAP 16.

**TABLEAU A 14.6. DONNEES D'ENTREE CONCERNANT LES PARTIES AERIENNES POUR LES MODEL CERES, EPIC Y NCSWAP**

CERES	EPIC	NCSWAP
1. Degrés-jours entre l'émergence et l'apparition de la sixième feuille.	1. Facteur de conversion par la culture de l'énergie des radiations solaires reçues.	1. Jours ou degrés-jours entre l'émergence et la pollinisation.
2. Degrés-jours entre l'apparition de la fleur femelle et la maturité	2. Pourcentage de la matière sèche produite par rapport au total final	2. Jours ou degrés jours entre l'émergence et la maturité.

- |   |   |  |
|---|---|--|
| 3. Coefficient de sensibilité photopériodique     | 3. Température optimale et minimale de croissance de la plante  | 3. Jours ou degrés-jours entre la maturité et la sénescence.   |
| 4. Nombre potentiel de grains par plante          | 4. Indice maximal de surface foliaire (*)   | 4. Jours suivant l'émergence durant lesquels la température du sol contrôle la croissance de la plante   |
| 5. Vitesse potentielle d'accroissement des grains | 5. Pourcentage du cycle végétatif quand l'indice de surface foliaire commence à décroître.  | 5. Jours ou degrés-jours entre l'émergence et le moment où le couvert maximum est atteint ou la biomasse totale atteinte au couvert maximal pour la densité considérée           |
|   | 6. Deux points de la courbe de développement de la surface foliaire pour la même densité de semis   | 6. Fraction de l'évapotranspiration potentielle représentant l'évaporation au couvert maximal à la densité de référence  |
|   | 7. Taux de décroissance de: l'Indice de surface foliaire la relation biomasse-énergie   | 7. Potentiel de production de matière sèche à la densité considérée  |
|   | 8. Hauteur maximale de la culture   | 8. Potentiel de production de Grains à la densité considérée   |
|   | 9. Concentration d'Azote dans les grains  | 9. Humidité des grains   |
|   | 10. Concentration de Phosphore dans les grains  | 10. Coefficients de la courbe d'accroissement de la matière sèche de la partie aérienne en fonction des jours ou degrés-jours écoulés depuis l'émergence à la densité considérée |
|   | 11. Indice de l'effet des stress hydriques sur la production.   | 11. Coefficients de la courbe d'accroissement de la matière sèche des grains en fonction des jours ou degrés-jours écoulés depuis l'émergence à la densité de référence.         |
|   | 12. Facteur d'impact des parasites sur la production  | 12. Concentration en Carbone de la matière sèche produite  |
|   | 13. Points de la courbe d'extraction de l'Azote par la plante à différentes étapes phénologiques (émergence, 50% du cycle, maturité physio. | 13. Points de la courbe de concentration de l'azote dans la partie aérienne de la plante   |

14. Pente de la courbe de variation du rapport: Partie aérienne/Racines en fonction du nombre de jours écoulés

15. Densité de semis optimale de la culture dont on a introduit la courbe de croissance relative comme donnée d'entrée

### 2.1.1. Le modèle CERES

Le modèle CERES est spécifique du maïs, alors que théoriquement les deux autres sont applicables à n'importe quel cycle complet d'une plante cultivée.

A première vue, ce tableau fait ressortir que le modèle CERES est celui qui demande le moins d'information et c'est une des raisons qui le rend plus attrayant que les autres. Il s'agit d'un modèle à dominante phénologique qui décrit le développement phénologique de la plante en fonction de l'énergie thermique reçue (unité thermique: degrés jours) et de la longueur de jour (effet de la photopériode sur l'anthèse). L'application de la définition d'unité thermique conduit à admettre qu'il est nécessaire d'accumuler une certaine somme de température au delà d'une température de base durant une période phénologique donnée. Une des limitations de cette méthode provient de la standardisation de la détermination du moment de la maturité physiologique.

Le maïs est une des cultures qui se prête le mieux à la prédiction du temps d'évolution des différentes phases phénologiques en fonction des unités thermiques. En effet, le développement de cette plante est principalement affectée par la température.

D'une manière générale, il s'agit d'une plante de sensibilité photopériodique neutre ou de jours courts (la floraison est induite par des nuits en croissance). Par contre sa réaction à la longueur de jour peut devenir un facteur important au moment d'introduire une nouvelle variété. Par exemple s'il s'agit de deux localités situées à la même latitude mais avec des distributions de précipitations différentes, la réaction de la variété pourra être différente.

La production de biomasse se détermine à partir de la radiation journalière et de l'Indice de surface foliaire (on utilise habituellement le sigle anglais LAI), qui est calculé quotidiennement. Les composantes phénologiques du modèle décrivent la répartition de la matière sèche entre les différents organes durant le cycle de croissance. De plus, le stade de maturité physiologique est facile à déterminer grâce à la tache noire qui apparaît à ce moment là à la base du grain.

L'un des objectifs des créateurs du modèle CERES, était de réduire au minimum le nombre de données d'entrée. Pour y parvenir ils ont proposé le concept de "coefficients génétiques". Ces coefficients servent à résumer les caractères génotypiques en intégrant les unités thermiques, l'influence photopériodique sur le début de la phase reproductive ainsi que d'autres aspects de la morphologie ou de la croissance. Le nombre de ces coefficients pourrait être très grand mais en pratique CERES se contente de cinq seulement. Les trois premiers reflètent le développement et la progression de la plante et les deux autres ceux de l'épi. En outre, certains coefficients génétiques intégrés dans les paramètres du modèles sont considérés comme constants pour tous les génotypes.

Le concept de coefficients génétiques se base sur l'hypothèse implicite de leur indépendance à l'égard du lieu de leur détermination ce que nous essayerons de vérifier à propos de certaines variétés tropicales évoquées dans le présent travail.

### 2.1.2. Les modèles EPIC et NCSWAP

Les modèles EPIC et NCSWAP ne tentent pas de simuler le développement phénologique de la plante comme CERES. Ils définissent plutôt des algorithmes pour calculer des courbes de production de matière sèche dans lesquelles les événements phénologiques, introduits comme variable externe, servent à délimiter les phases de calculs tels que le début du remplissage des grains ou de la sénescence.

Il est important de noter en terminant ce commentaire, que l'objectif principal du modèle NCSWAP est surtout de simuler les transformations de l'azote organique dans le système eau-sol-plante, cette dernière étant surtout considérée du point de vue de sa fonction d'extraction de l'azote du sol et de l'engrais.

#### 2.1.2.1. EPIC

Dans le cas du modèle EPIC, la donnée la plus importante pour déterminer le développement et la croissance de la plante est la somme potentielle d'unités thermiques (degrés-jours) nécessaires à la plante pour atteindre sa maturité. Cette donnée peut être considérée comme variable d'entrée ou calculée à partir de variables externes: dates de semis, de récolte, températures moyennes mensuelles.

L'évolution de la plante au cours du temps est défini dès le départ par une courbe de développement de la surface foliaire considéré comme caractéristique de la culture considérée.

Le modèle calcule quotidiennement la relation entre les degrés-jours accumulés depuis le semis et la somme nécessaire pour arriver à la maturité. Cette relation conditionne la simulation par le modèles de l'accroissement de la surface foliaire et, par voie de conséquence, le calcul de production réelle de biomasse végétale ainsi que la répartition de la matière sèche entre la matière sèche et les racines. La production de grains est ensuite déduite de celle de la matière sèche selon une relation ("harvest index"):

$$\text{Indice de récolte} = \frac{\text{Grains (Matière sèche)}}{\text{Biomasse aérienne (M.S.)}}$$

### 2.1.2.2. NCSWAP

Pour le modèle NCSWAP, l'évolution de la plante dépend tout d'abord de variables d'entrée fixant les dates des événements phénologiques à partir de nombre de jours ou de degrés-jours.

Pour simuler la croissance NCSWAP utilise une courbe de production potentielle de biomasse et de grain spécifique de la culture étudiée. Le calcul de la production réelle durant la simulation dépendra du nombre de jours ou de degrés jours écoulés selon le type de courbe enregistré. Dans le cas où l'on utilisera les degrés-jours la vitesse de développement sera affectée par la température journalière. La distribution de la matière sèche produite entre les racines et les parties aériennes est déterminée par la courbe d'évolution du rapport PA/R en fonction des jours écoulés.

### 2.2. Algorithmes qui définissent le développement et la croissance de la plante

L'idée directrice de cette partie est de mettre en évidence comment agit chacun des modèles pour calculer le développement et la croissance potentielle de la plante, et pour évaluer la distribution de la biomasse produite entre les différents organes de la plante. Nous présenterons les algorithmes principaux dans lesquels entrent en jeu les données d'entrée requises par chacun des modèles.

#### CERES

Pour évaluer la production quotidienne de matière sèche, on admet que la radiation photosynthétiquement active équivaut à 50% de la radiation quotidienne:

$$PAR = 0.50 * SOLRAD$$

PAR = radiation photosynthétiquement active  
SOLRAD = radiation (MJ/m<sup>2</sup>)

On calcule la production potentielle de matière sèche:

$$PCARB = 5.0 * PAR / PLANTS * (1 - \exp(-0.65 * LAI))$$

PCARB = production potentielle de matière sèche  
(g/plante)  
PAR = radiation photosynthétiquement active  
(MJ/m<sup>2</sup> d)  
PLANTS = densité de plantation (plantes/m<sup>2</sup>)  
LAI = indice foliaire (calcul journalier)

Selon le stade de développement de la plante, on calcule l'augmentation de la surface foliaire et la distribution de la matière sèche produite (après avoir considéré les facteurs de stress par température, eau ou N). Les stades auxquels se réalisent les calculs sont:

- 1 de l'émergence à la fin de la phase juvénile
- 2 de la fin de la phase juvénile au début de la floraison masculine
- 3 du début de la floraison masculine au début de la floraison féminine (fin de la croissance des feuilles)
- 4 de la floraison féminine au début du remplissage effectif des graines.
- 5 phase du remplissage effectif des graines

La croissance de la surface foliaire se calcule seulement aux stades 1, 2 et 3. A partir du stade 1, on calcule la surface correspondant à la sénescence des feuilles. L'équation de base qui sert au calcul de la croissance quotidienne de la surface foliaire est la suivante:

$$PLAG = 3.5 * XN * XN * TI * SWDF2$$

PLAG = croissance quotidienne de la surface foliaire

XN = nombre de feuilles en expansion calculé à partir des unités thermiques écoulées

TI = fraction de la feuille qui émerge durant le jour, dépendant des degrés-jours accumulés pendant le jour considéré

SWDF2 = facteur qui affecte l'expansion cellulaire par déficit d'eau pendant le jour considéré

La surface potentielle d'une feuille augmente lentement et de façon linéaire pour les premières feuilles. Puis cet accroissement devient parabolique avant de se stabiliser et enfin de se réduire pour les dernières feuilles.

$$SLAN = SUMDTT * PLA / 10000$$

SLAN = sénescence totale depuis le début de la phase (cm<sup>2</sup>/plante)

SUMDTT = somme des degrés-jours écoulés dans la phase phénologique considérée

PLA = surface totale foliaire de la plante (cm<sup>2</sup>/plante)

Pour les stades 3,4 et 5, on calcule de la façon suivante:

$$SLAN = PLA / 1000 \quad \text{stade 3}$$

$$SLAN = PLA * (0.05 + SUMDTT / 170 * 0.05) \quad \text{stade 4}$$

$$SLAN = PLA * (0.1 + 0.08 * (SUMDTT / P5)**3) \quad \text{stade 5}$$

P5 = donnée d'entrée qui correspond aux degrés-jours entre la floraison féminine et la maturité physiologique

LAI pour chaque jour se calcule selon:

$$\text{LAI} = (\text{PLA} - \text{SENLA}) * \text{PLANTS} * 0.0001$$

LAI = indice de surface foliaire

PLA = surface totale foliaire de la plante  
(cm<sup>2</sup>/plante)

SENLA = surface foliaire qui est sénescence  
pendant le jour considéré (cm<sup>2</sup>/plante)

PLANTS = densité de plantation (plantes/m<sup>2</sup>)

La durée de chaque phase phénologique s'évalue de la façon suivante:

stade 1 La fin de cette phase est atteinte lorsque la somme des degrés-jours accumulés est égale ou supérieurs à la donnée d'entrée P1 qui correspond aux degrés jours entre l'émergence et la fin de la phase juvénile (apparition de la sixième feuille)

stade 2 La fin de cette phase se produit lorsque la somme quotidienne de la variable RATEIN atteint la valeur de 1:

$$\text{RATEIN} = 1 / (4 + \text{P2} * (\text{HRLT} - 12.5))$$

P2 = donnée d'entrée du  
coefficient de sensibilité  
photopériodique

HRLT = durée du jour en heures  
(si HRLT < 12.5 on le  
considère égal à 12.5)

stade 3 La fin de cette phase est atteinte lorsque la somme des degrés-jours est égale ou supérieure à P3, ce dernier se calculant à partir du nombre potentiel de feuilles qui doivent croître sur la plante et la somme totale des degrés-jours déjà écoulés depuis l'émergence:

$$\text{P3} = (\text{TLNO} - 2) * 38.9 + 96 - \text{SUMDTT}$$

TLNO = nombre potentiel de  
feuilles de la plante  
(calculé)

SUMDTT = somme des degrés-jours  
entre l'émergence et la  
fin du stade 2

- stade 4 se termine quand la somme des degrés-jours de ce stade est égale ou supérieure à 170
- stade 5 on atteint la fin de cette phase quand les degrés-jours accumulés durant ce stade est égal ou supérieur à  $P5 * 0.95$  (P5 correspond aux degrés-jours entre la floraison féminine et la maturité physiologique)
- stade 6 on atteint la fin de cette phase quand les degrés-jours accumulés depuis la fin du stade 4 est égal ou supérieur à P5 (durant ce stade on ne fait pas de calculs relatifs à la production de matière sèche)

Quand on atteint la phase finale du stade 4, on calcule le nombre de grains par plante:

$$GPP = G2 * (PESKR - 195) / (1213.2 + PESKR - 195)$$

$$PESKER = SUMP * 1000 / IDURP * 3.4 / 5$$

GPP = nombre de grains par plante

G2 = donnée d'entrée du nombre potentiel de grains par plante

PERSK = vitesse moyenne de la photosynthèse pour le stade 4

SUMP = la photosynthèse accumulée pendant le stade 4 (g/plante)

IDURP = durée du stade 4 (j)

La croissance des grains pendant une journée se calcule au stade 5 selon:

$$GROGRN = RGFILL * GPP * G3 * 0.001 * (0.45 + 0.55 * SWDF1)$$

GROGRN = la croissance totale des graines pendant une journée (g/plante)

RGFILL = facteur de stress traduisant sur la croissance des grains, l'effet de la température moyenne du jour, prend les valeurs de 0-1 à partir d'un optimum de 26°C

GPP = nombre de graines par plante

G3 = donnée d'entrée relative à la vitesse potentielle de croissance des grains (mg / grain j-1)

SWDF1 = facteur qui affecte la photosynthèse par déficit d'eau le jour considéré

Aux stades 1 et 2, la matière sèche produite se distribue entre les feuilles et les racines; au stade 3, elle se distribue entre les feuilles, tige et racines; au stade 4, elle se distribue entre l'épi, feuilles-tiges et racines. Au stade 5, de la matière sèche totale produite dans la journée, on retire ce qui va au grain selon la dernière équation présentée, et le reste se divise par moitié entre les feuilles-tiges et les racines.

La priorité de chaque organe dans la distribution est dans l'ordre que nous avons décrit, où la racine s'obtient toujours par différence entre le total de la matière sèche produite dans la journée et celle redistribuée entre les autres organes.

Aux stades 1 et 2, le nouveau poids des feuilles est évalué de la façon suivante:

$$XLFWT = (PLA / 267) ** 1.25$$

XLFWT = poids total des feuilles le jour  
considéré

PLA = surface foliaire totale (cm<sup>2</sup>/plante)

Au stade 3, la croissance quotidienne des feuilles et des tiges se calcule selon:

$$GROLF = 0.00116 * PLAG * PLA ** 0.25$$

$$GROSTM = GROLF * 0.0182 * (XN - XNTI)**2$$

GROLF = croissance par jour des feuilles  
(g/plante)

PLAG = croissance du jour de la surface  
foliaire

PLA = surface foliaire totale (cm<sup>2</sup>/plante)

GROSTM = croissance par jour de tige (g/plante)

XN = nombre de feuilles en expansion calculé  
à partir des unités thermiques  
écoulées.

XNTI = nombre de feuilles quand a lieu la  
floraison masculine

Au stade 4, les feuilles cessent de croître et commence la croissance de l'épi; les tiges et les racines continuent à croître:

$$GROEAR = 0.22 * DTT * SWDF2$$

$$GROSTM = GROEAR * 0.40$$

GROEAR = croissance par jour des épis  
(g/plante)  
 DTT = degrés-jours du jour considéré  
 SWDF2 = facteur qui affecte l'expansion  
cellulaire par déficit d'eau le jour  
considéré  
 GROSTM = croissance par jour des tiges  
(g/plante)

### Conclusion

De la présentation des algorithmes de CERES il ressort qu'ils prétendent à une description la plus précise possible du développement du maïs. En revanche le modèle n'a aucune chance de pouvoir être appliqué à d'autres plantes sinon au prix d'un sérieux travail d'adaptation. Grâce à ce genre de travaux d'adaptation ont été produits des modèles CERES-riz, CERES-soja et même CERES-pomme de terre. Mais il n'en existe aucun qui puisse simuler la croissance d'un fourrage de pâture ou de coupe.

La précision obtenue par l'utilisation des facteurs génétiques de chaque plante est assez grande mais par contre les facteurs de milieu influent assez peu sur le résultat final de la simulation sauf dans les cas où joue un facteur limitant comme nous le verrons à l'occasion des calculs de sensibilité.

### EPIC

Pour calculer la croissance quotidienne potentielle de la culture, on détermine l'interception de la radiation solaire avec l'équation de Beer (MONSI y SAEKI 1953, p. 57), de la même façon que dans CERES :

$$PAR = 0.0005 * RA * (1 - \exp(-0.65 * SLAI))$$

PAR = radiation photosynthétiquement active (MJ/m<sup>2</sup>)  
 RA = radiation solaire du jour considéré (MJ/m<sup>2</sup>)  
 SLAI = indice de la surface foliaire du jour  
considéré

Pour évaluer la matière sèche potentielle produite le jour considéré, on utilise la proposition de MONTEITH (1977) :

$$DDM = WA(JE) * PAR * (1 + HR1)^{**3}$$

DDM = matière sèche potentielle produite le  
jour considéré (t/Ha)  
 WA(JE) = donnée d'entrée relative au facteur de  
conversion de l'énergie en biomasse pour  
la culture JE (Kg/MJ)  
 HR1 = changement dans la longueur des heures de  
jour de la journée considérée (calculé à  
partir de la latitude h/d)

La fraction de degrés-jours accumulés jusqu'au jour considéré détermine: LAI, la sénescence, le poids des racines et de la partie aérienne, ainsi que la production de la culture pour ce jour:

$$SYP = HU / XPHU$$

SYP = fraction de degrés-jours accumulés  
jusqu'au jour considéré  
HU = degrés-jours accumulés jusqu'au jour  
considéré  
XPHU = degrés-jours potentiels requis par la  
culture pour atteindre la maturité

LAI depuis l'émergence jusqu'à LAI maximal se calcule selon:

$$F = SYP / (SYP + \exp(DLAP(JE,1) - DLAP(JE,2) * SYP))$$

$$FF = F - WLW$$

$$X1 = DMLA(JE)$$

$$XX = FF * X1$$

si  $XX > 0$  alors  $SLAI = SLAI + XX * SHRL * \sqrt{REG} * (1 - \exp(5 * (SLAI - X1)))$

F = facteur qui dépend de la fraction de  
degrés-jours accumulés qui affecte  
l'augmentation de la surface foliaire  
DLAP(JE,1) = premier point de la courbe de  
développement de la surface foliaire  
de la culture JE  
DLAP(JE,2) = second point de la courbe de  
développement de la surface foliaire  
de la culture JE

SYP = fraction de degrés-jours accumulés  
avant d'atteindre la maturité  
FF = accroissement du facteur F pour le  
jour considéré  
WLW = valeur du facteur F pour le jour  
antérieur  
X1, DMLA(JE) = valeur de LAI maximal potentiel pour  
la culture JE  
XX = variable intermédiaire pour le calcul  
qui à son tour permet de déterminer  
si on n'est pas arrivé à LAI maximum  
SLAI = LAI  
SHRL = 1 ou 0 selon la nécessité de faire  
jouer XX  
REG = facteur minimum de stress sur la  
culture entre température, eau,  
azote ou phosphore

Lorsque LAI commence à décliner, c'est-à-dire quand la simulation de l'évolution de la culture atteint la sénescence, donnée prise comme input, le calcul de LAI se fait de la façon suivante:

$$\begin{aligned} XDLA0 &= 1 - XDLAI \\ SLA0 &= SLAI \text{ quand LAI commence à décliner} \\ XX &= (1 - SYP) / XDLA0 \\ XX &= \log(XX) \\ RTO &= RLAD(JE) * XX \quad \text{si } RTO < -10 \text{ alors } RTO = -10 \\ SLAI &= \min(SLAI, SLA0 * 10^{**RTO}) \end{aligned}$$

XDAL0 = fraction de cycle où il y a déclin de LAI  
XDLAI = donnée d'entrée correspondant à la fraction du cycle où LAI commence à décliner  
SLA0 = valeur de LAI calculé lorsque LAI commence à décliner  
SYP = fraction de degrés-jours accumulés jusqu'au jour considéré

XX = variable intermédiaire  
RTO = variable intermédiaire  
RLAD(JE) = donnée d'entrée de la culture JE qui correspond au paramètre qui gouverne la vitesse de déclin de LAI  
SLAI = LAI du jour considéré  
min = fonction de la valeur minimale des valeurs placées entre parenthèses

La biomasse de la partie aérienne et des racines se calcule selon:

$$\begin{aligned} DM &= DM + RGD \\ RGD &= DDM * XX \\ RW &= DM * (0.4 - 0.2 * SYP) \\ STL &= DM - RW \end{aligned}$$

DM = matière sèche accumulée jusqu'au jour considéré  
RGD = matière sèche produite durant la journée après avoir tenu compte de l'effet de stress du jour sur la culture et la sénescence (t/Ha)  
DDM = croissance potentielle du jour considéré  
XX = facteur qui inclut le minimum des stress dû au manque d'aération du sol, au manque d'eau, manque de N ou manque de P, et inclut aussi le stress dû aux attaques parasitaires et l'effet de la sénescence (ce facteur n'inclut pas le stress par température, qui est évalué à part)

RW = poids des racines (t/Ha)  
 SYP = fraction en degrés-jours accumulés jusqu'au  
 jour considéré  
 STL = matière sèche de la partie aérienne (t/Ha)

La production de grains, comme nous l'avons dit auparavant, est déterminée également par les degrés-jours accumulés, dont le calcul se fait sur la base d'une courbe sigmoïde représentant la relation production/biomasse totale en fonction de la fraction des degrés-jours accumulés. Les paramètres de cette courbe sont des constantes fixes établies par les créateurs du modèle:

$$F = \text{SYP} / (\text{SYP} + \exp(6.5038 - 9.9995 * \text{SYP}))$$

$$\text{FF} = F - \text{YLD}$$

$$\text{AJHI} = \text{AJHI} + \text{HI}(\text{JE}) * \text{FF}$$

si  $0.3 < \text{SYP} < 0.9$

$$F = \text{sen}(5.2359 * (\text{SYP} - 0.3))$$

$$\text{AJHI} = \max(\text{AJHI} - \text{HI}(\text{JE}) * (1 - 1 / (1 + \text{WSFY}(\text{JE}) * F * (0.9 - \text{WS}))), 0.01)$$

F = facteur de la courbe S de la relation de biomasse totale/production en fonction de la fraction des degrés-jours accumulés  
 SYP = fraction de degrés-jours accumulés jusqu'au jour considéré  
 FF = augmentation du facteur F pour le jour considéré  
 YLD = valeur du facteur F du jour antérieur  
 AJHI = production de grains (Kg.ha-1)  
 HI(JE) = donnée d'entrée qui correspond à la relation production/biomasse aérienne de la culture JE  
 sen = fonction sinus  
 max = fonction de la valeur maximale des valeurs placées entre parenthèses  
 WSFY(JE) = donnée d'entrée qui correspond au facteur d'effet du stress de l'eau sur la production  
 WS = stress de l'eau sur la culture

## Conclusion

En conclusion nous pouvons relever que, par rapport à CERES les calculs de simulation de production de matière par la photosynthèse sont conduits de manière un peu plus arbitraire en fonction du nombre de degrés-jours et d'une courbe d'allure sigmoïde dont les paramètres sont fixés une fois pour toutes par les auteurs du modèle.

Cet arbitraire est toutefois tempéré par le fait que le modèle s'appuie sur des valeurs de surface foliaire qui fournissent une base objective pour des mesure de calibration en fonction du type de plante et de validation en fonction du lieu et des conditions de culture.

Comme dans tous les modèles, la production optimale de référence est modulée par les facteurs de stress liés à l'aération, l'humidité, l'abondance d'azote et de phosphore.

### NCSWAP

Pour calculer la production quotidienne potentielle de matière sèche de la partie aérienne, on utilise les coefficients (introduits comme données c.f. Tableau A 14 1), de la fonction de croissance relative de la matière sèche de la partie aérienne suivante:

$$DW = DWHA * (A0 / (1 + \exp(A1 + A2*IQ + A3*IQ**2 + A4*IQ**3)))$$

DW = matière sèche potentielle de la partie aérienne produite jusqu'au jour IQ (ou jusqu'aux degrés-jours DDAY) (Kg.ha-1)

DWHA = donnée d'entrée qui correspond à la production potentielle de la matière sèche totale de la partie aérienne (Kg.ha-1) à la densité de la culture de référence

A0, A1, A2, A3 = données d'entrée qui correspondent aux coefficients de la courbe de croissance relative de la partie aérienne, obtenues à partir de l'ajustement à cette courbe de données expérimentales de production de matière sèche, en fonction des jours ou degrés-jours

IQ = jours après l'émergence (= DDAY si l'on utilise la courbe en fonction de degrés-jours)

On détermine quelle est la croissance potentielle de la partie aérienne durant le jour considéré et la croissance réelle due aux effets des stress de azote, eau et/ou température et correspondant à la densité de la culture actuelle:

$$DRYRATE = DW - DWR$$

$$DELDRY = DRYRATE * CRRED * PPOPRED$$

$$TOP = TOP + DLTOP$$

DRYRATE = production de matière sèche potentielle sur la partie aérienne pendant le jour considéré (Kg.ha-1)

DW = matière sèche potentielle de la partie aérienne produite jusqu'au jour considéré

DWR = matière sèche potentielle de la partie aérienne produite le jour antérieur

- DELDRY = production de matière sèche de la partie aérienne après avoir considéré les effets de la densité de la culture et les stress d'eau, azote et/ou température (Kg.ha-1) pendant le jour considéré
- CERRED = facteur de stress dû à l'eau, au azote et/ou à la température pour le jour considéré
- PPOPRED = relation entre la densité actuelle et la densité optimale de la culture de référence
- DLTOP = production de matière sèche sur la partie aérienne en  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  pendant le jour considéré
- TOP = matière sèche sur la partie aérienne accumulée jusqu'au jour considéré ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

Dans le cas de la biomasse des racines, on calcule également chaque jour la matière sèche potentielle et la matière sèche après considération des facteurs de la densité actuelle de la culture et des stress par eau, azote et/ou température:

$$\text{DLROOTR} = (\text{DWR} * (1 / \text{SR2}) - (\text{DWR} - \text{DRYRATE}) * (1 / \text{SR1})) * 10$$

$$\text{DLROOT} = \text{TOP} * (1 / \text{SR2}) - (\text{TOP} - \text{DLTOP}) * (1 / \text{SR1})$$

- DLROOTR = augmentation de la matière sèche potentielle des racines pendant le jour considéré ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- DWR = matière sèche potentielle de la partie aérienne accumulée jusqu'au jour considéré (kg.ha-1)
- SR1 = relation de la matière sèche de PA/RA du jour antérieur (PA = partie aérienne, RA = racines)
- SR2 = relation de la matière sèche de PA/RA du jour considéré
- DRYRATE = croissance potentielle de la matière sèche de la partie aérienne pendant le jour considéré (kg.ha-1)
- DLROOT = croissance de la matière sèche réelle des racines pendant le jour considéré ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- TOP = matière sèche de la partie aérienne accumulée au jour considéré ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )
- DLTOP = croissance de la matière sèche de la partie aérienne ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

Le début de la production de grains se détermine avec la donnée d'entrée relative au jour ou degrés-jours après l'émergence où se produit la pollinisation. Une fois déterminé

le début de la production de grains, on calcule la production potentielle et la production réelle de grains selon:

$$YMR = ADW * YMHA / DWR$$

$$YIELD = YMR * (B0 / (1 + \exp(B1 + B2*IC + B3*IC**2 + B4*IC**3)))$$

$$REFY = YMHA * (B0 / (1 + \exp(B1 + B2*IC + B3*IC**2 + B4*IC**3)))$$

YMR = production maximale de grains attendue d'après la matière sèche produite pour le jour considéré (kg.ha-1), en supposant qu'il existe une relation directe entre la biomasse et la production équivalente au concept de "harvest index" utilisé dans EPIC

ADW = matière sèche accumulée dans la partie aérienne jusqu'au jour considéré (kg.ha-1)

IC = jours après la pollinisation (ou DDAYSTP dans le cas où l'on travaille avec des degrés-jours)

YMHA = donnée d'entrée qui correspond à la production potentielle dans des conditions optimales (kg.ha-1)

DWR = matière sèche potentielle accumulée dans la partie aérienne jusqu'au jour considéré (kg.ha-1)

YIELD = matière sèche accumulée dans les grains jusqu'au jour considéré (kg.ha-1)

REFY = matière sèche potentielle accumulée dans les grains au jour considéré (kg.ha-1)

B0,B1,B2,B3,B4 = données d'entrée correspondant aux coefficients de la courbe de croissance relative des grains, obtenues à partir de l'ajustement à cette courbe des données expérimentales d'accumulation de matière sèche dans les grains, en fonction des jours ou degrés-jours

## Conclusion

La manière de traiter la simulation du développement des parties aériennes par NCSWAP est encore plus simple dans la mesure où ce modèle ne fait pas appel à la surface foliaire mais seulement aux poids de matière sèche produite. Les données d'entrée relatives à la sénescence et à "full canopy" sont utilisées pour calculer les facteurs qui affectent le calcul quotidien de la transpiration de la plante. A partir de l'évapotranspiration, on détermine le stress d'eau et son effet sur la production de biomasse et de grains. Les autres facteurs de stress pris en compte sont seulement l'azote et la température.

### **2.3. Conclusion sur les données concernant les parties aériennes**

Les trois modèles étudiés nous fournissent trois exemples de complexité décroissante dans la manière de traiter le problème de la simulation de la croissance et du développement des parties aériennes et éventuellement des grains.

CERES représente le cas le plus complexe puisqu'il fait appel à la définition de stades phénologiques codifiés selon une série d'observations précises et étroitement liées à la physiologie de la croissance et de la reproduction d'une seule plante, le maïs.

EPIC envisage les choses d'une manière un peu plus simple et standardisée en utilisant des courbes type dont la position peut être "calée" de manière assez précise en s'appuyant sur des mesures de surface foliaire adaptées à chaque type de plante.

NCSWAP va encore plus loin dans la standardisation et la versatilité au niveau de la plante puisqu'il n'utilise que des mesures de poids de matière sèche produite quelque soit le type de plante dont il simule la croissance grâce à des courbes types adoptées une fois pour toutes.

### **3. Production et récollecion de données utilisées dans les analyses de sensibilité.**

#### **3.1. Les cultures de référence**

On a utilisé des résultats de cultures effectuées dans deux régions du Venezuela (Barinas dans les Llanos occidentaux et Maracay Région centrale) afin de déterminer les coefficients génétiques (CERES) de trois variétés de maïs utilisées au Venezuela (PB8, MAQ, DMR). En ce qui concerne les modèles EPIC y NCSWAP, on dispose seulement d'un jeu de données pour la région de Barinas et pour une seule variété (PB8).

Les caractéristiques pédoclimatiques de chaque région sont résumées dans le Tableau A 14 7.

TABLEAU A 14.7. CARACTERISTIQUES PEDO-CLIMATIQUES DE BARINAS ET MARACAY

DESCRIPTION	BARINAS	MARACAY	
Pays (état)	Vénézuéla (Barinas)	Vénézuéla (Aragua)	
Station expérimentale	Jardin Botanique UNELLEZ	CENIAP	
Date de la culture	du 15/12/89 au 04/04/90	17/02/86 au 15/05/89	
Latitude	8.62 °N	10.17 °N	
Périodes de pluie (% de la pluviosité annuelle)	avril à novembre (86%)	avril à novembre (86%)	
Pluviosité de l'année de la culture	1270 mm (1989) 1595 mm (1990)	-	
Radiation moyenne quotidienne de l'année de la culture	14.13 MJ/m <sup>2</sup> (1989)	-	
Température moyenne annuelle	26.5 °C	id	
Amplitude maximum entre la température maximale et minimale moyenne de chaque mois	3 °C	id	
Classification du sol de la station	ALFISOL OXIC TROPUSTALF	FLUVENTIC HAPLUSTOLL	
Albédo du sol	0.13	id	
Composition de sable et limon et pH par horizon	horizon	Sable % Limon % pH	hor S% L% pH
	0 -20 cm	69 12 5,6	0-10 35 40 5,10
	20 -30	61 5 5,5	10-30 32 43 5,10
	30 -60	53 23 5,9	30-70 48 37 5,80
	60 -90	51 21 6,3	70-100 64 27 6,80
	90 -105	51 9 6,4	100-130 85 10 7,10

C organique et N total par horizon	horizon (cm)	C %	N tot. hor		C%			
			g.t.-1					
	0 -20	0.7	600	0-10	0,81			
	20 -30	0.6	500	10-30	0,83			
	30 -60	0.5	400	30-70	0,52			
	60 -90	0.3	300	70-100	0,27			
	90 -105	0.2	200	100-130	0,41			
Densité apparente par horizon	horizon (cm)	densité g/cm <sup>3</sup>		hor	densité g/cm <sup>3</sup>			
	0 -20	1.20		0-10	1,40			
	20 -30	1.57		10-30	1,60			
	30 -60	1.53		30-70	1,70			
	60 -90	1.59		70-100	1,60			
	90 -105	1.59		100-130	1,50			
Contenu en eau au point de flétrissement, capacité au champ et saturation (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	horizon	P.F.	C.C.	Sat.	hor	P.F.	C.C.	Sat.
	0 -20	0.170	0.298	0.412	0-10	0,050	0,30	0,39
	20 -30	0.208	0.316	0.390	10-30	0,076	0,32	0,47
	30 -60	0.205	0.347	0.364	30-70	0,071	0,34	0,40
	60 -90	0.235	0.347	0.377	70-100	0,093	0,32	0,37
	90 -105	0.270	0.360	0.401	100-130	0,117	0,32	0,41
Drainage du profil (fraction drainée par jour)	0.7	-						
	(valeur donnée pour un profil bien drainé)							
Coefficient de l'état 1 d'évaporation du sol, RITCHIE (1972)	9.44	-						
Numéro de la courbe SCS utilisée pour calculer l'écoulement selon JONES y KINIRY (1986)	81.0	-						

Dans le Tableau A 14 8. sont présentées les données de gestion des cultures. Pour l'expérience de Barinas, l'objectif était de mener à bien la culture dans des conditions optimales d'alimentation hydrique et azotée. La culture a donc été irriguée et l'apport d'azote a été fractionné en 9 applications. En outre, on a pratiqué un contrôle phytosanitaire le plus strict possible, afin d'obtenir les meilleures valeurs de potentiel génétique tels que: LAI maximal potentiel, production potentielle de biomasse aérienne et de grains.

TABLEAU A 14.8. GESTION DES DIFFERENTES CULTURES

DESCRIPTION	BARINAS(89-90) <sup>1</sup>	MARACAY (1986)
Variétés	PB8; MAQ, DMR	
Taille des parcelles de coefficients génétiques (nombre de parcelles)	10*8 m <sup>2</sup> (2 par variété)	
Taille des parcelles de production potentielle (nombre de parcelles)	22*4 m <sup>2</sup> (3 pour PB8)	
Distance entre rangs	1 m	
Distance entre plantes	0.25 m	
Densité de plantation	4 plantas/m <sup>2</sup>	
Date de semis	15/12/89	
Date d'éclaircie	14 jas*	
Fertilisation N	jas*	dose A Kg N/Ha
		dose B <sup>2</sup> Kg N/Ha
* jours après semis	0	20
	14	10
	28	20
	35	60
	42	40
	49	40
	56	30
	63	30
	70	20
Fertilisation P	superphosphate triple 0 jas 100 kg.ha-1	
Fertilisation K	chlorure de potasse 0 jas :100 kgK.ha-1	
Oligo-éléments	0 jas 2 kg.ha-1 du mélange de sels	

Contrôle manuel des mauvaises herbes	jas : -18,6,14,21,25
Contrôle chimique des mauvaises herbes	herbicide dose jas
	Roundup 3L/Ha -25,-7
	Gramoxone 2L/Ha -8,56,64,89
	Limpia maíz 5kg.ha-1 18
Application d'insecticide	insecticide dose jas
	Lannate 1L/Ha 14,26,41,47,52
	Thiodrex 2L/Ha 61,68,76,86
Application de fongicide	Benlate 2kg.ha-1 70 jas
Irrigation	par gouttes, moyenne 6 mm.j-1 variant de 2mm.j-1 à 8-9 au moment de la floraison
Date de récolte	132 jas

1 données d'après URBINA (1990)

2 dose A = 270 Kg N/Ha

dose B = 108 Kg N/Ha

\* jas = jours après le semis

### 3.2. Les données obtenues, issues de la bibliographie ou assumées comme ordre de grandeur acceptable

Avec l'expérience de Barinas, on prétendait également obtenir expérimentalement le plus grand nombre possible de données d'entrée requises par les différents modèles. Les courbes de croissance relative de la biomasse aérienne et des grains par exemple, ont été obtenues expérimentalement. Cependant, un nombre non négligeable de données d'entrée ont du être approximées ou obtenues à partir de la bibliographie.

Par exemple, les déterminations de la date des événements phénologiques, des coefficients génétiques et de la maturité physiologique ont été réalisées d'après MARRERO (1987), la courbe de variation de la surface foliaire a été établie d'après MUCHOW (1988).

TABLEAU A 14.9. DONNEES DE LA PLANTE OBTENUES DANS LES DIFFERENTES EXPERIENCES

DONNEE D'ENTREE	MODELE	UNITE
Degrés-jours entre l'émergence et l'apparition de la sixième feuille	CERES	degrés-jours
Degrés-jours entre la floraison féminine et la maturité physiologique	CERES	degrés-jours
Jours ou degrés-jours entre l'émergence et la pollinisation	NCSWAP	jours
Jours ou degrés-jours entre l'émergence et la maturité physiologique	NCSWAP	jours
Jours ou degrés-jours du début de la sénescence avant d'atteindre la maturité physiologique	NCSWAP	jours
Jours ou degrés-jours entre l'émergence et le moment où est atteint "full canopy"	NCSWAP	jours
Nombre potentiel de grains par plante	CERES	grain/plante
Rapidité potentielle de croissance des grains	CERES	mg/grain/jour
Production potentielle de matière sèche aérienne à la densité de la culture de référence (40000 pl.ha-1)	NCSWAP	kg.ha-1
Production potentielle de grains à la densité de la culture de référence (40000 plantes/Ha)	NCSWAP	kg.ha-1
Densité de plantation actuelle	CERES NCSWAP	plantes/m2 plantes.ha-1
Densité de plantation optimale de la culture de référence	NCSWAP	plantes.ha-1



LAI potentiel maximal

EPIC\* 5.0

cela dépend de la densité de plantation dans notre cas, nous avons les résultats pour les mesures de LAI faites à Barina 89-90, et pour les densités plantation 40000 plant/Ha y 80000 plant/Ha, les LAI seraient:

LAI mesuré dans la culture 15/12/89-26

JAS	SURF/PLA cm <sup>2</sup>	CV %	LAI 40000	LAI 80000
14	114.79	23.46	0.05	0.09
21	357.02	27.61	0.14	0.29
27	767.8	25.85	0.31	0.61
36	1731.07	23.82	0.69	1.38
42	2940.17	24.36	1.18	2.35
49	5092.04	25.03	2.04	4.07
56	6416.28	23.11	2.57	5.13
63	6492.31	22.58	2.6	5.19
70	6250.06	22.15	2.5	5.00
77	6423.36	29.32	2.57	5.14
98	4558.73	34.28	1.82	3.65
105	3896.49	41.21	1.56	3.12
111	3850.33	47.29	1.54	3.08

JAS= jours après les semilles

Selon LEON (1982), le LAI de PB8 à une densité de 80000 plant/Ha est de 4.07.

Fraction du cycle quand LAI commence à décliner

EPIC\* 0.8

Selon notre expérience, LAI commence à décliner 65 jours après l'émergence, ce qui correspond à une fraction du cycle de 0.61

Deux points de la courbe du développement de la surface foliaire

EPIC\* 15% 0.05  
50% 0.95

selon notre expérience:  
durée de la culture = 106 jours après l'émergence  
LAI maximal = 6492 cm<sup>2</sup>/plante  
à 16 jours: % du cycle = 15  
fraction de LA = 0.055  
à 51 jours: % du cycle = 48  
fraction de LA = 0.988

Paramètre de la vitesse de déclin de LAI

EPIC\* 1.00

Paramètre de la vitesse de déclin de la relation bionasse-énergie

EPIC\* 1.00

Code de tolérance du Al	EPIC*	3.00	
Hauteur maximale de la culture	EPIC*	2.50	
Concentration de N dans les grains	EPIC*	0.0175	selon notre expérience, la concentration d dans le grain est de: 2,16 ‰ pour une fertilisation N de 270 kg. 2,43 ‰ pour une fertilisation N de 108 kg.
Concentration de P dans les grains	EPIC*	0.0025	
Facteur de l'effet du stress hydrique sur la production de grains	EPIC*	0.05	
Facteur de l'effet des parasites sur la production	EPIC*	0.95	
Humidité des grains	EPIC*	0.15	
Points de la courbe d'extraction de N par la plante, Concentration à: l'émergence	EPIC*	0.0440	selon notre expérience la concentration en N est de: émergence 5,42‰
50% du cycle		0.0164	50% du cycle 2,00‰
la maturité physiologique		0.0128	maturité physiologique 1,48‰
Points de la courbe d'extraction de P par la plante, Concentration à l'émergence	EPIC*	0.0063	
50% du cycle		0.0023	
la maturité physiologique		0.0018	
Total potentiel de degrés-jours requis pour atteindre la maturité	EPIC*		estimé par le programme à partir des données de semis, récolte et température moyenne mensuelle
Jours après l'émergence où contrôle la croissance depuis l'émergence la croissance de la plante	NCSWAP	0	on a supposé que la température de l'air
Fraction de l'évapotranspiration potentielle qui reste comme évadonnées d'évapotranspiration potentielle déterminée	NCSWAP	0.32	on a utilisé l'algorithme proposé par JONE KINIRY (1986) pour calculer cette valeur, par ORDAZ (1986) et LAI déterminé sur le t pour 40000 plantes/Ha
Fraction de C dans la matière sèche de la culture	NCSWAP	0.40	valeur approximée

Pente de la relation linéaire  
de la courbe  
PA/RA(POIDS SEC) vs JOURS

NCSWAP 0.1

par ajustement des données obtenues de  
FOTB(1962)

\* NOTE : La majorité des données d'entrée relatives à la partie aérienne de la plante pour le modèle EPIC ont été prises de ceux rapportés dans la documentation de EPIC, en considérant que ces valeurs sont le produit d'une étude basée sur plusieurs expériences et pour avoir observé que les valeurs que nous avons obtenues sur le terrain, se rapprochent passablement des valeurs rapportées par EPIC.

### 3.3. Résultats des Analyses de sensibilité effectuées

Une fois décrites les propositions de chaque modèle pour évaluer la production de biomasse et de grains, et sans entrer pour l'instant dans la discussion des calculs relatifs à la nutrition en eau et N, nous pouvons comparer les résultats de simulation de chaque modèle pour des conditions pédo-climatiques et de gestion des cultures identiques, quant à la production de biomasse et de grains.

En effet la forme la plus facile et la plus habituelle d'évaluer un modèle de sol-climat-plante consiste à comparer les observations de terrain avec les résultats du modèle au niveau de la production de matière sèche et de grain. Dans ce travail, on analysera en outre les résultats de LAI et d'évapotranspiration accumulative quand ce sera nécessaire.

Afin de déterminer quel est l'effet de la précision que doivent avoir les données d'entrée de la plante, (et être en mesure d'écarter les facteurs qui pourraient être éventuellement omis dans l'évaluation du fonctionnement adéquat du modèle en zone tropicale) on observera l'effet des variations de quelques-unes des données d'entrée relatives à la partie aérienne de la plante, soit à partir des données obtenues sur le terrain ou à partir de la bibliographie ou encore assumées comme ordre de grandeur acceptable.

Cette analyse de sensibilité, permettra d'évaluer en conclusion le degré de précision requis pour les différentes données d'entrée discutées ici, et leur effet respectif sur la qualité de la simulation.

#### 3.3.1. CERES

Pour ce travail, les 6 données d'entrée sur la partie aérienne de la plante (PA), requises par le modèle CERES, ont toutes été obtenues expérimentalement. On les trouvera réunies dans le tableau A 14 11. avec leur marge et le pas de variation utilisés pour l'analyse de sensibilité.

TABLEAU A 14.11. DONNEES D'ENTREE DE LA PARTIE AERIENNE VARIABLE ET RANG DE VARIATION POU SENSIBILITE

MODELE	DONNEE	VARIÉTÉ	VALEUR BASE	MARGE DE VARIATION	PAS DE LA VARIATION
CERES P1	:degrés-jours entre l'émergence et l'apparition de la 6ème feuille	PB8	293	275 - 311	18 degrés-jours
		MAQUINA	311	293 - 329	18
		DMR	338	320 - 356	18
(on présume 18 degrés-jours j.-1, l'estimation de cette valeur peut être de plus ou moins 1 jour)					
P2	:coefficient de sensibilité photopériodique (j.h-1)	PB8	0.52	0.00 - 0.80	0.10
		DMR	0.52	0.42 - 0.62	0.10
P5	:degrés-jours entre la floraison féminine et la maturité physiologique	PB8	987	969 - 1002	18 degrés-jours
		MAQUINA	893	875 - 911	
		DMR	923	905 - 941	
(on présume 18 degrés-jours j.-1, l'estimation de cette valeur peut être de plus ou moins 1 jour)					
G2	:nombre potentiel de grains par plante	PB8	438	400 - 600	50
		MAQUINA	544	500 - 700	50
		DMR	516	500 - 700	50
(la valeur obtenue à Barinas est bien différente de la valeur obtenue à Maracay)					
G3	:vitesse potentielle de croissance des grains (mg/grain/jour)	PB8	8.61	8.5 - 9.75	0.25
		MAQUINA	5.73	5.75- 9.75	1.00
		DMR	7.14	7.0 - 9.00	0.50
(les valeurs de base sont celles obtenues à BARINAS)					

### CERES: Donnée P1

Les résultats de l'analyse de sensibilité réalisée pour P1 (degrés- jours entre l'émergence et l'apparition de la sixième feuille), dans laquelle on présume que l'erreur expérimentale est de plus ou moins un jour (ce qui équivaut à environ 18 degrés-jours, Tableau A 14 11), apparaissent dans le Tableau A 14 12 pour les trois variétés (PB8, MAQ y DMR) et pour deux doses de N (270 et 108 Kg N/Ha). La valeur de base apparaît en caractère gras entre la valeur minimale et maximale.

TABLEAU A 14.12. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR P1  
 RESULTATS DE LA SIMULATION  
 (BARINAS, DATE DE SEMIS 15 DEC 1989)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	P1 degrés-jours	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE* kg.ha-1	MAX LAI	FIN JUVENIL	MAT PHYSIOLOGIQUE
PB8	270	275	4171 (-6)	10123	2.47	3 Jan	3 Avr
		293	4177	10050 (-73)	2.48	4 Jan	3 Avr
		311	4175 (-2)	10044 (-6)	2.48	4 Jan	3 Avr
PB8	108	275	3971 (-6)	9298 (+47)	2.10	3 Jan	3 Avr
		293	3977	9251	2.11	4 Jan	3 Avr
		311	3976 (-1)	9244 (-7)	2.11	4 Jan	3 Avr
MAQ	270	293	2932 (0)	8815 (+5)	2.48	4 Jan	29 Mar
		311	2932	8810	2.48	4 Jan	29 Mar
		329	3160 (+228)	9382 (+572)	2.60	5 Jan	31 Mar
MAQ	108	293	2789 (+1)	8069 (+7)	2.11	4 Jan	29 Mar
		311	2788	8062	2.11	4 Jan	29 Mar
		329	3009 (+221)	8630 (+568)	2.22	5 Jan	31 Mar
DHR	270	320	3851 (-27)	10073 (-358)	2.60	5 Jan	1 Avr
		338	3878	10431	2.73	6 Jan	3 Avr
		356	3933 (+55)	10835 (+404)	2.88	7 Jan	5 Avr
DHR	108	320	3669 (-30)	9290 (-321)	2.22	5 Jan	1 Avr
		338	3699	9611	2.34	6 Jan	3 Avr
		356	3764 (+65)	10007 (+396)	2.48	7 Jan	5 Avr

On peut observer dans ce tableau que chaque variété a une réponse de simulation différente à la variation de P1. L'erreur que l'on peut commettre en déterminant P1 (de plus ou moins 1 jour) a des conséquences sur les résultats simulés de production de grains et de biomasse aérienne que l'on ne peut deviner a priori, et qui sont en relation étroite avec les autres coefficients génétiques.

#### CERES : Donnée P2

Le laps de temps entre la fin de la phase juvénile et le début de la floraison masculine augmente proportionnellement à la vitesse de P2 (coefficient de sensibilité photopériodique) exprimé en nombre de jours par heure supplémentaire de lumière, sur la base de 12.5 heures de lumière j.-1. Dans ce travail, on lui a attribué une valeur base d'après la bibliographie (0.52 j.h-1), Tableau A 14 13.

L'expérience de Barinas s'est déroulée pendant la période de l'année où le jour est le plus court. On observe que la variation de la valeur de P2 ne produit aucun effet lorsqu'on simule le développement de la variété PB8 avec une dose de 270 Kg N/Ha (Tableau A 14 13), de même que pour DMR avec une dose de 108 Kg N/Ha. Ceci correspond au fait que le nombre d'heures de lumière de la journée est inférieur ou égal à 12.5.

On a effectué également la simulation de la croissance du PB8 dans les conditions de l'expérience de Maracay, soit à la période de l'année où les jours sont les plus longs, et on n'a pas observé non plus de différence, excepté dans le cas où P2 est égal à 0 (Tableau A 14 13).

Ceci nous montre que l'algorithme du modèle n'est pas capable de traduire la sensibilité photopériodique du maïs en région tropicale pour le moins sous notre latitude. Dans notre cas la valeur de P2 n'est donc pas importante.

TABLEAU A 14.13. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR P2  
(BARINAS, DATE DE SEMIS 15 DEC 1989 MARACAY, DATE DE SEMIS 17.02.86)

VARIETE	LIEU	DOSE N kg.ha-1	P2 j.h-1	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	DEBUT FLORAISON MASCULINE	MAT PHYSIOLOGIQUE
PB8	BARINAS	270	0.00	4177	10050	8 Jan	3 Avr
			0.42	4177	10050	8 Jan	3 Avr
			0.52	4177	10050	8 Jan	3 Avr
			0.62	4177	10050	8 Jan	3 Avr
			0.80	4177	10050	8 Jan	3 Avr
PB8	MARACAY		0.00	7793	14990	15 Mar	7 Jun
			0.22	8017	15579	16 Mar	9 Jun
			0.42	8017	15579	16 Mar	9 Jun
			0.52	8017	15579	16 Mar	9 Jun
			0.62	8017	15579	16 Mar	9 Jun
			0.80	8017	15579	16 Mar	9 Jun
DMR	BARINAS	108	0.00	3699	9611	10 Jan	3 Avr
			0.42	3699	9611	10 Jan	3 Avr
			0.52	3699	9611	10 Jan	3 Avr
			0.62	3699	9611	10 Jan	3 Avr
			0.80	3699	9611	10 Jan	3 Avr

## CERES Donnée : P5

Les résultats de la simulation par variation de P5 (degrés-jours entre la pollinisation et la maturité physiologique) plus ou moins 1 jour (plus ou moins 18 degrés-jours) démontrent qu'il a un effet directement proportionnel sur la production de grains et de biomasse d'environ 100 kg.ha<sup>-1</sup>, excepté dans le cas de MAQ lorsque P5 passe de 875 à 893 degrés-jours (Tableau A 14.14), où l'on n'observe aucune variation bien que la maturité physiologique se produise avec un jour de retard. La raison de ce fait pourrait être que MAQ possède une faible valeur de G3 dont l'effet peut se s'ajouter à celui de la température moyenne et d'un stress d'eau momentané, selon l'algorithme du modèle (cf. p.29). Toutefois, un effet de plus ou moins 100 kg.ha<sup>-1</sup> sur la récolte de grain n'est pas très significatif du point de vue agronomique.

TABLEAU A 14.14. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR P5  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, DATE DE SEMIS 15 DEC 1989)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	P5 degrés-jours	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	POLLINISATION	MAT PHYSIOLOGIQUE
PB8	270	969	4075 (-102)	9950 (-100)	10 Feb	2 Avr
		987	4177	10050	10 Feb	3 Avr
		1002	4278 (+101)	10150 (+100)	10 Feb	3 Avr
PB8	108	969	3880 (-97)	9155 (-96)	10 Feb	2 Avr
		987	3977	9251	10 Feb	3 Avr
		1002	4075 (+98)	9346 (+95)	10 Feb	3 Avr
MAQ	270	875	2932	8810	10 Feb	28 Mar
		893	2932	8810	10 Feb	29 Mar
		911	3017 (+85)	8894 (+84)	10 Feb	30 Mar
MAQ	108	875	2788	8062	10 Feb	28 Mar
		893	2788	8062	10 Feb	29 Mar
		911	2869 (+81)	8142 (+80)	10 Feb	30 Mar
DMR	270	905	3776 (-102)	10331 (-100)	14 Feb	2 Avr
		923	3878	10431	14 Feb	3 Avr
		941	3984 (+106)	10535 (+104)	14 Feb	4 Avr
DMR	108	905	3601 (-98)	9515 (-96)	14 Feb	2 Avr
		923	3699	9611	14 Feb	3 Avr
		941	3800 (+101)	9703 (+92)	14 Feb	4 Avr

## CERES : Donnée G2

On a estimé que la détermination expérimentale de G2 (nombre de grains/plante) pourrait avoir un coefficient de variation d'environ 10%, de qui équivaut à plus ou moins 50 grains/plante. En outre, il y a une différence appréciable entre cette valeur déterminée à Barinas et celle déterminée à Maracay trois ans auparavant C'est pourquoi nous avons jugé utile de rappeler les valeurs de G2 dans le Tableau A 14 15 en les accompagnant des résultats expérimentaux obtenus à Barinas. Pour tenir compte de cette variabilité sans doute due aux conditions de production de semence de cette variété nous avons élargi l'analyse fait à 6 cas au lieu de 3 avec un accroissement de 50 grains/plante pour les trois variétés et pour 2 doses de N.

TABLEAU A 14.15. CERES VALEURS DE G2 DETERMINEES SUR LE TERRAIN  
OBSERVATIONS DE TERRAIN

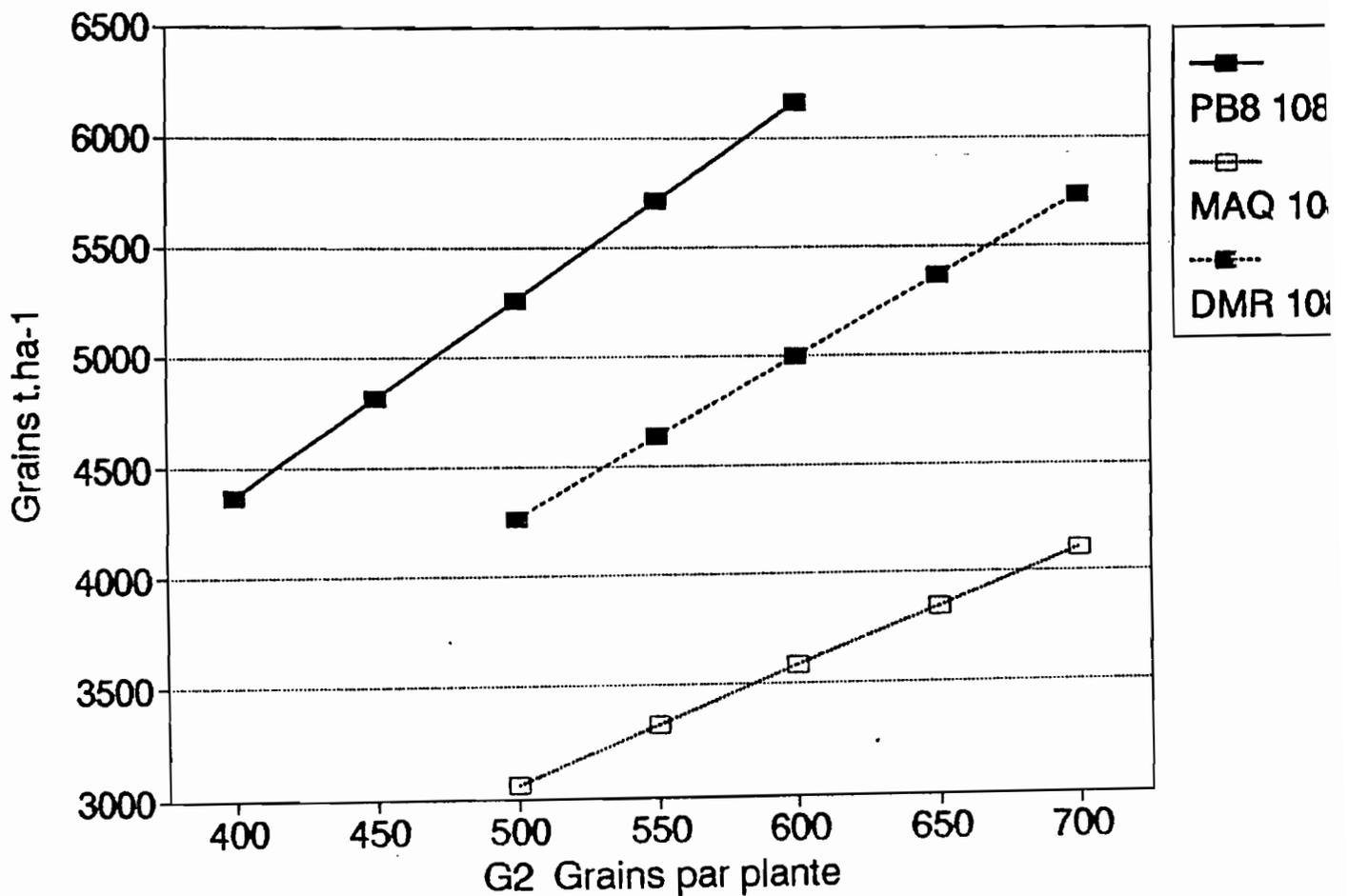
VARIETE	LOCALITE	G2 (GRAINS/PLANTE)	DOSE N kg.ha-1	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	GRAINS/EPIS nombre
PB8	BARINAS	438	270	4789	13217.	367.00
			108	4510	13153.	346.00
	MARACAY	598				
MAQ	BARINAS	544	270	4382	11562.	354.00
			108	3111	9665.	252.00
	MARACAY	763				
DHR	BARINAS	516	270	5404	14368.	430.00
			108	4895	11145.	390.00
	MARACAY	709				

TABLEAU A 14.16. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR G2  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, DATE DE SEMIS 15 DEC 1989)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	G2 gr/plante	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	GRAINS/EPIS nombre
PB8	270	400	3871 (-803)	9745 (-802)	291.22
		450	4273 (-401)	10146 (-401)	321.37
		500	4674	10547	351.53
		550	5075 (+401)	10948 (+401)	381.68
		600	5476 (+802)	11316 (+769)	411.83
PB8	108	400	3690 (-756)	8963 (-747)	277.55
		450	4069 (-377)	9341 (-369)	305.99
		500	4446	9710	334.43
		550	4825 (+379)	9973 (+263)	362.88
		600	5203 (+757)	10207 (+497)	391.32

# CERES : ANALYSE DE SENSIBILITE POUR G2

## Comparaison des trois varietes



MAQ	270	500	2723 (-466)	8600 (-467)	351.40
		550	2956 (-233)	8833 (-234)	381.54
		600	3189	9067	411.68
		650	3422 (+233)	9300 (+233)	441.82
		700	3656 (+467)	9525 (+458)	471.96
MAQ	108	500	2589 (-441)	7864 (-441)	334.27
		550	2810 (-220)	8084 (-221)	362.70
		600	3030	8305	391.12
		650	3250 (+220)	8520 (+215)	419.55
		700	3470 (+440)	8716 (+411)	447.98
DMR	270	500	3780 (-654)	10332 (-654)	370.69
		550	4107 (-327)	10659 (-327)	402.76
		600	4434	10986	434.83
		650	4761 (+327)	11313 (+327)	466.90
		700	5088 (+654)	11640 (+654)	498.97
DMR	108	500	3606 (-619)	9518 (-619)	353.64
		550	3916 (-309)	9827 (-309)	384.00
		600	4225	10137	414.37
		650	4535 (+383)	10447 (+310)	444.73
		700	4844 (+692)	10669 (+532)	475.09

On peut observer que dans le cas du PB8, un accroissement de 50 grains/plante produit une augmentation de la production de grains d'environ 390 kg.ha-1. Pour MAQ, cette augmentation est d'environ 225 kg.ha-1 et pour DMR de 320 kg.ha-1. Ceci pour une densité de plantation de 40000 plantes/Ha dans les trois cas. (Tableau A 14 16). Cette différence dans l'accroissement se trouve en relation étroite avec la différence de vitesse de remplissage du grain (G3), car la vitesse la plus grande correspond à PB8 et la plus petite à MAQ.

Généralement ce coefficient et G3 sont ceux qui s'ajustent le mieux lorsqu'on essaie de calibrer les données de la plante d'une culture avec le modèle (LIU et al 1989, CARBERRY et al 1989). Ensuite on valide les valeurs de G2 et G3 ainsi obtenues avec d'autres expériences, afin de vérifier si le modèle continue à donner des résultats proches de la réalité avec les données de la plante obtenues par la calibration initiale.

Si nous devons calibrer G2 pour PB8 par rapport à la production de grains, nous verrions que la valeur simulée qui se rapproche le plus des résultats de production de grains (Tableaux A 14 15 et 16) est de 500 grains/plante pour la dose de 270 Kg N/Ha. Et si nous la validons avec l'expérience correspondant à la dose de 108 Kg N/Ha, nous voyons que les résultats de la simulation se rapprochent de la réalité. La valeur de G2 de 500 grains/plante se trouve entre les valeurs déterminées sur le terrain à Barinas et à Maracay (Tableau A 14 15).

Si nous faisons la même analyse pour DMR, nous trouverions que la valeur de G2 de 700 grains/plante, très proche de la valeur déterminée à Maracay (Tableaux A 14 15 et 16), pourrait être la valeur obtenue par calibration et qui se valide correctement pour la dose de 108 Kg N/Ha.

Pour MAQ la valeur de calibration de G2 devrait être supérieure à 700 grains/plante, valeur proche de celle obtenue à Maracay ; cependant, en la validant (avec l'expérience de la dose de 108 Kg N/Ha), nous voyons que le résultat de la simulation est très supérieur au résultat du terrain. La valeur de simulation qui dans ce cas se rapproche le plus du résultat expérimental est pour G2= 600 grains/plante.

Si nous essayons de calibrer G2 par rapport à un autre paramètre tel que nombre de grains par épis ou biomasse produite, dans certains cas le résultat coïncide bien et dans d'autres on arrive très loin des valeurs de calibration obtenues par rapport au nombre de grains/plante.

Il s'agit d'un coefficient dont l'effet est important sur les résultats de la simulation de la production de grains: il doit être traité avec beaucoup de soin au niveau des cultures de référence.

### CERES : Donnée G3

Ce coefficient qui concerne la vitesse de remplissage des grains, a un effet direct sur les résultats de la simulation de poids du grain, et par conséquent sur les résultats de production de grains (Tableau A 14 17).

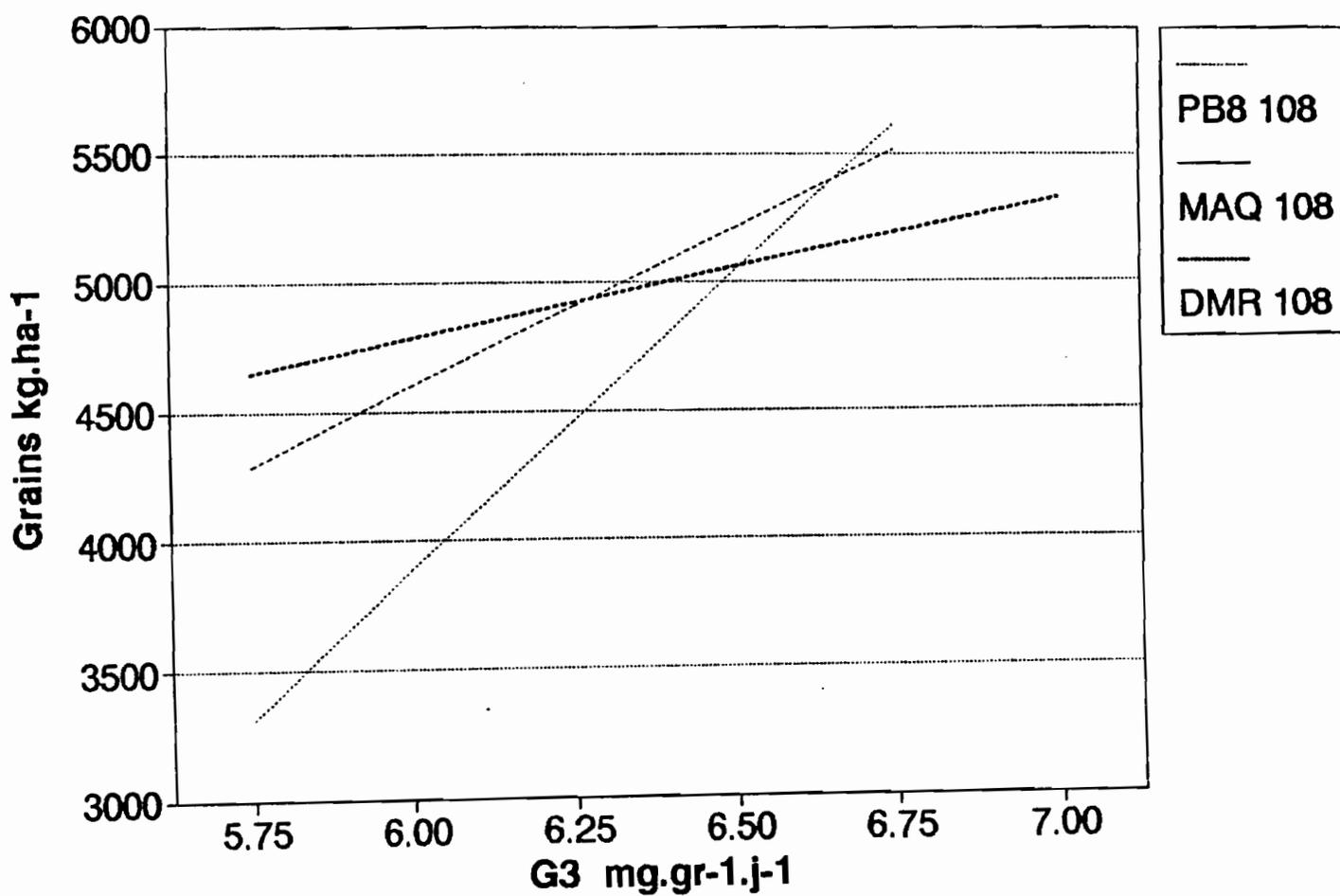
Parmi les données d'entrée de la plante requises par le CERES, celle-ci est sans doute la plus fastidieuse à déterminer expérimentalement, et présente en outre une grande imprécision (Tableau A 14 18.). La marge de variation de l'analyse de sensibilité a été choisi en fonction de la différence qui existait entre les valeurs déterminées à Barinas et celles déterminées à Maracay (Tableau A 14 19.).

TABLEAU A 14.17. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR G3  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, DATE DE SEMIS 15 DEC 1989)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	G3 mg/grain/jour	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	POIDS DU GRAIN g
PB8	270	8.50	4124 (-242)	9997 (-242)	.328 (-0,019)
		8.75	4244 (-122)	10118 (-121)	.338 (-0.009)
		9.00	4366	10239	.347
		9.25	4487 (+121)	10361 (+122)	.357 (+0.010)
		9.75	4729 (+363)	10603 (+364)	.376 (+0.029)
PB8	108	8.50	3927 (-231)	9200 (-231)	.328 (-0,019)
		8.75	4042 (-116)	9315 (-116)	.338 (-0.009)
		9.00	4158	9431	.347
		9.25	4273 (+115)	9546 (+115)	.357 (+0.010)
		9.75	4505 (+347)	9747 (+316)	.376 (+0.029)

# CERES: ANALYSE DE SENSIBILITE POUR G3

## Comparaison des trois varietes



MAQ	270	5.75	2942 (-1024)	8820 (-979)	.194 (-0,068)
		6.75	3454 (-512)	9332 (-467)	.228 (-0,034)
		7.75	3966	9799	.262
		8.75	4478 (+512)	10247 (+448)	.296 (+0,034)
		9.75	4990 (+1024)	10673 (+874)	.330 (+0,068)
MAQ	108	5.75	2798 (-972)	8072 (-897)	.194 (-0,068)
		6.75	3284 (-486)	8551 (+418)	.228 (-0,034)
		7.75	3770	8969	.262
		8.75	4257 (+487)	9348 (+379)	.296 (+0,034)
		9.75	4744 (+972)	9704 (+735)	.330 (+0,068)
DMR	270	7.00	3802 (-543)	10354 (-544)	.250 (-0,036)
		7.50	4074 (-271)	10626 (-272)	.268 (-0,018)
		8.00	4345	10898	.286
		8.50	4616 (+271)	11169 (+271)	.303 (+0,017)
		9.00	4888 (+543)	11441 (+543)	.321 (+0,035)
DMR	108	7.00	3627 (-518)	9200 (-231)	.250 (-0,036)
		7.50	3885 (-260)	9315 (-116)	.268 (-0,018)
		8.00	4145	9431	.286
		8.50	4403 (+258)	9546 (+115)	.303 (+0,017)
		9.00	4663 (+518)	9747 (+316)	.321 (+0,035)

TABLEAU A 14.18. CERES AUGMENTATION DU POIDS DES GRAINS (mg/grain)  
OBSERVATIONS DE TERRAIN (BARINAS 89-90) d'après URBINA (1990)

Jours après semis	PB8	MAQ	DMR	( ) déviation standard
71	23.(21)	23.(14)	19.(13)	
78	74.(38)	84.(28)	74.(28)	
80	98.(36)	120.(32)	115.(31)	
84	156.(45)	164.(28)	173.(31)	
91	203.(55)	197.(69)	204.(30)	
99	269.(60)	235.(43)	261.(36)	
103	308.(31)	277.(50)	302.(43)	
111	325.(40)	309.(68)	314.(42)	

TABLEAU A 14.19. CERES VALEURS DE G3 DETERMINEES SUR LE TERRAIN

VARIETE	LOCALITE	G3 (mg/grain/jour)
PB8	BARINAS	8.61
	MARACAY	9.11
MAQ	BARINAS	5.73
	MARACAY	9.75
DMR	BARINAS	7.14
	MARACAY	9.14

TABLEAU A 14.20. CERES COMPARAISON DE L'EFFET DU MEME ACCROISSEMENT DANS G3  
SUR LA PRODUCTION DE GRAINS : RESULTATS DE LA SIMULATION

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	G3 mg/grain/jour	GRAINS kg.ha-1
PB8	270	8.75	4244
		9.75 (+1.00)	4729 (+485)
PB8	108	8.75	4042
		9.75 (+1.00)	4505 (+463)
MAQ	270	5.75	2942
		6.75 (+1.00)	3454 (+512)
MAQ	108	5.75	2798
		6.75 (+1.00)	3284 (+486)
DHR	270	7.00	3802
		8.00 (+1.00)	4345 (+543)
DHR	108	7.00	3627
		8.00 (+1.00)	4145 (+518)

On observe que pour les trois variétés, l'accroissement de G3 produit une augmentation du poids du grain (et donc de la production de grains) directement proportionnelle à cet accroissement. La valeur de l'augmentation du poids du grain pour le même accroissement de G3, est différent selon la variété et selon la dose de N (Tableau A 14 20), sans doute en raison de la valeur de P5 (degrés-jours entre la pollinisation et la maturité physiologique) et de la combinaison des conditions d'alimentation azotée et hydrique. Cependant, la production de grains augmente de près d'une 1/2 T/Ha dans tous les cas, pour une croissance d'une unité de G3. La sensibilité à ce paramètre est donc considérable et il doit être traité avec autant de soin que G2 bien qu'il soit beaucoup plus difficile à déterminer.

### 3.3.2. EPIC

Dans le cas d'EPIC, bien que beaucoup de données d'entrée aient été prises de la documentation, on possède 8 données expérimentales sur les 17 requises.

- facteur de conversion d'énergie de rayonnement en matière sèche
- matière sèche de grains/matière sèche de la PA
- LAI potentiel maximal
- Fraction du cycle végétatif au moment où LAI commence à décliner
- Courbe d'évolution de LAI
- Concentration de N dans les grains
- Courbe d'extraction du N par la PA de la plante
- Total potentiel des degrés-jours entre l'émergence et la maturité

TABLEAU A 14.21. DONNEES D'ENTREE DE LA PARTIE AERIENNE VARIABLE ET RANG DE VARIATION

Sigle	DONNEE	VARIÉTÉ	VALEUR BASE	RANG DE VARIATION	ACCROISSEMENT DE LA VARI.
DLP 1 et 2	points de la courbe du développement optimal de LAI	PB8	DOC	DOC et BAR	
	(on a utilisé les données de la documentation de EPIC (DOC) et les données obtenues expérimentalement à Barinas (BAR))				
DMLA	LAI potentiel maximal (la documentation de EPIC ne spécifie pas le rapport de LAI avec la densité de plantation de la culture)		5.0	2.0-6.0	1.0
RLAD et DLAI	paramètre de déclin de LAI par sénescence		1.0	0.5-2.0	0.5 y 1.0
WSFY	facteur qui affecte la production de grains par stress d'eau (selon la documentation de EPIC, la valeur est de 0.05 pour le maïs)		0.01	0.01-0.05	0.02
WA	facteur de conversion de l'énergie de rayonnement en matière sèche		4.00	3.50-4.00	0.25
HI	relation grains/matière sèche de la culture		0.5	0.4-0.6	0.1
EPIC	fraction du cycle quand LAI commence à décliner		0.8	0.6-0.8	0.1

#### EPIC : Donnée LAI

Cette analyse consiste uniquement à faire varier les deux points de la courbe de l'évolution de LAI (DLP1 et DLP2) selon la documentation de EPIC (DOC) et selon les données expérimentales obtenues à Barinas (BAR). Nous pouvons observer les résultats dans le Tableau A 14 22.

TABLEAU A 14.22. EPIC COMPARAISON DES COURBES DE LAI  
 RESULTATS DE LA SIMULATION  
 (BARINAS DEC 89-AVR 90)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	DONNEES DE LA COURBE DE LAI	POINTS DE LA COURBE DE LAI		GRAINS T/Ha	BIOMASSE T/Ha	PARTIE AERIENNE T/Ha	RACINES T/Ha	STRESS HYDRIQUE nb. de J.
			POINT1	POINT2					
PB8	270	DOC	15.050	50.950	4.72	13.32	10.62	2.70	23.8
		BAR	15.055	48.988	4.74	13.57	10.81	2.76	25.1
PB8	108	DOC	15.050	50.950	4.72	13.32	10.62	2.70	23.8
		BAR	15.055	48.988	4.74	13.57	10.81	2.76	25.1

(DOC d'après les données de la documentation de EPIC, BAR d'après les données expérimentales obtenues à Barinas. Le nombre avant le point indique % du cycle et le nombre après le point indique la fraction du LAI maximal)

Nous noterons que, selon que l'on utilise les données obtenues expérimentalement à Barinas (BAR) ou les données de la documentation (DOC) la différence obtenue en simulation est que BAR atteint le LAI maximal avant DOC, ce qui concorde avec les valeurs des points expérimentaux (Tableau A 14 21).

Cependant, dans les deux cas, le LAI maximal a la même valeur et est de beaucoup supérieur à la valeur de terrain. Ceci est dû au fait que cette valeur dépend directement de la donnée d'entrée ou LAI maximal potentiel, donnée dont EPIC ne spécifie pas si elle est maximale indépendamment de la densité ou pour la densité que l'on va simuler, vu que EPIC ne demande à aucun moment la densité de plantation. On peut supposer qu'il se réfère à une densité standard définie une fois pour toute mais nous n'en avons pas trouvé trace.

La sénescence commence à la même date dans les deux simulations, parce que cela dépend seulement de la donnée d'entrée DLAI (fraction du cycle quand LAI commence à décliner). Cependant, une différence apparaît dans la rapidité et dans la forme de la sénescence entre ce qui est simulé et ce qui est observé sur le terrain.

Comme nous le verrons plus loin, si nous analysons le résultat de la simulation uniquement au travers des résultats de production de grains, nous dirions que EPIC simule mieux que CERES, car les résultats simulés par EPIC (selon les données de base choisies) sont plus proches de la réalité que ceux simulés par CERES pour des données de base correspondantes.

## EPIC : Donnée DMLA

Comme nous l'avons signalé dans le paragraphe précédent, la valeur de LAI maximal en simulation dépend de la valeur de DMLA (LAI potentiel maximal) que l'on entre. Nous avons signalé également que la documentation de EPIC ne précisait pas si cette donnée d'entrée était dépendant de la densité de plantation. Dans le cas de PB8, LAI maximal potentiel obtenu sur le terrain, pour une densité de 40000 plantes/Ha, est de 2.6, et nous pouvons voir que la courbe pour DMLA = 3 se rapproche beaucoup de la courbe expérimentale à cette densité de plantation.

La valeur d'entrée de DMLA affecte également la production de biomasse et de grains (Tableau A 14 23).

L'effet de l'augmentation de DMLA suit le fait biologique qui veut que, au fur et à mesure qu'augmente la densité de la plantation, augmente LAI maximal et augmente la production jusqu'à arriver à un plafond, mais cette augmentation n'est pas linéaire. C'est ainsi que pour des valeurs basses de DMLA, une variation d'une unité a un effet plus grand sur la production de grains et de biomasse que pour des valeurs élevées de DMLA.

TABLEAU A 14.23. EPIC ANALYSE DE SENSIBILITE POUR DMLA  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS DEC 89-AVR 90)

VARIETE	DOSE N	DMLA	GRAINS	BIOMASSE PA	
	kg.ha-1		T/Ha	T/Ha	
PB8	270	2.00	3.55	7.73	
			3.00	4.17 (+0.62)	9.21 (+1.48)
			4.00	4.50 (+0.33)	10.06 (+0.85)
			5.00	4.72 (+0.22)	10.62 (+0.56)
			6.00	4.84 (+0.12)	10.96 (+0.34)

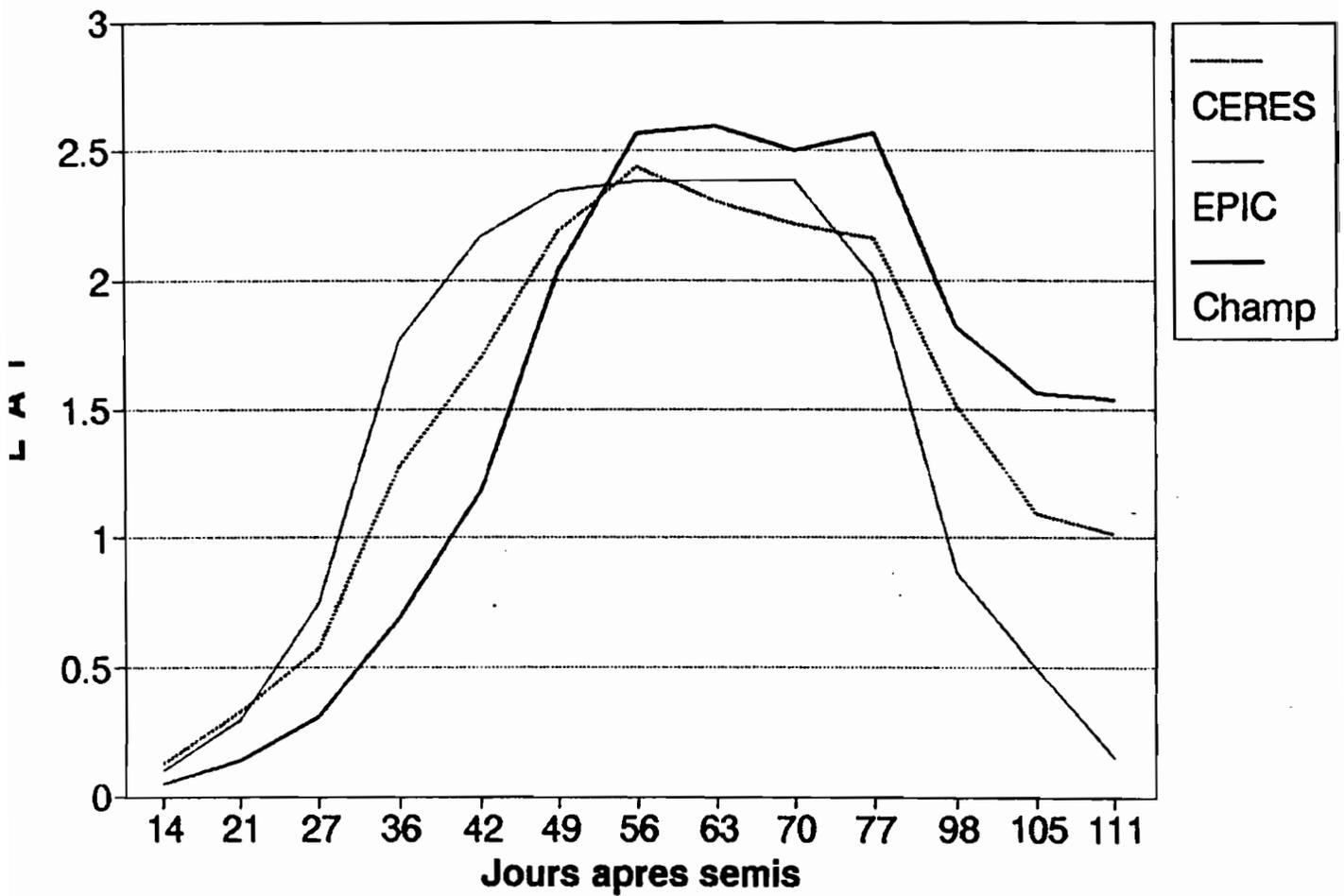
## EPIC : Données RLAD et DLAI

RLAD y DLAI (respectivement paramètre de la vitesse de déclin de LAI et fraction de cycle quand LAI commence à décliner) sont en rapport avec le calcul de la sénescence de la culture, et affectent directement les résultats de la production de biomasse. L'effet sur la production de grain est proportionnel à l'effet sur la biomasse (Tableau A 14 24).

D'après la documentation de EPIC, RLAD prend les valeurs de 0.5 pour le sorgho, de 1 pour le maïs, le blé, l'orge et l'avoine, et 2 pour les blés "durhan" et "spring". En faisant la simulation avec les valeurs de 0.5, 1 et 2, nous observons que la différence dans les résultats de simulation de production de biomasse et de grains n'est guère substantielle (Tableau E.4.). On observe seulement une petite différence dans la simulation de l'évolution de LAI.

# SURFACE FOLIAIRE

## COMPARAISON SIMULATIONS/MESURES



DLAI pour le maïs, selon la documentation de EPIC, est de 0.8, alors que notre valeur expérimentale est de 0.61 (Tableau 5). D'après les résultats de la simulation, une différence de 0.61 à 0.8 pour DLAI, peut produire une différence de 2 T/Ha dans la production de biomasse, et, proportionnellement, on obtient une différence de presque 1 T/Ha dans la production de grains (Tableau A 14 24). Evidemment DLAI affecte considérablement l'évolution de LAI, et par conséquent la production de matière sèche.

Il convient de rappeler que l'observation de la sénescence est visuelle, et non instrumentale, et tend donc à être quelque peu subjective. Pour cette raison, si DLAI a une sensibilité élevée sur les résultats de simulation, c'est une donnée d'entrée que l'on doit mesurer avec un maximum de précaution.

TABLEAU A 14.24. EPIC ANALYSE DE SENSIBILITE POUR RLAD ET DLAI  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS DEC 89-AVR 90)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	RLAD	GRAINS T/Ha	BIOMASSE PA T/Ha	Rapport GRAINS/PA
PB8	270	0.5	4.76	10.73	0.467
		1.0	4.72 (-0.04)	10.62* (-0.11)	0.467
		2.0	4.62 (-0.10)	10.41 (-0.21)	0.467
		DLAI	GRAINS T/Ha	BIOMASSE PA T/Ha	Rapport GRAINS/PA
PB8	270	0.6	4.00	8.99	0.467
		0.7	4.38 (+0.38)	9.85 (+0.86)	0.468
		0.8	4.72 (+0.34)	10.62* (+0.77)	0.467

1 PA = matière sèche de la partie aérienne

\* résultats en utilisant les données RLAD et DLAI d'après la documentation de EPIC

#### EPIC : Donnée WSYF

WSFY est défini dans la documentation de EPIC comme le facteur qui affecte la production de grains en raison du stress d'eau, et que l'on utilise selon l'algorithme présenté dans ce document. D'après la documentation de EPIC, il a la valeur 0.01 pour toutes les cultures, excepté pour le maïs où il est de 0.05. La signification de ce facteur n'est pas très explicite. Il s'agit d'un facteur qui affecte uniquement la valeur de la production de grains (Tableau A 14 25). Pour nos analyses, on a pris de façon arbitraire une valeur de WSYF égale à 0.01. Mais nous pouvons observer que, bien que la signification de WSYF ne soit pas explicite, lorsque sa valeur passe de 0.01 à 0.05, la production diminue de presque 1 T/Ha dans nos conditions de simulation (données d'entrées d'après DOC).

**TABLEAU A 14.25. EPIC ANALYSE DE SENSIBILITE POUR WSFY  
(BARINAS DEC 89-AVR 90)**

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	WSFY	GRAINS T/Ha	BIOMASSE PA T/Ha	STRESS D'EAU jours	
PB8	270	0.01	4.72	10.62	23.8	
			0.03	4.30 (-0.42)	10.62	23.8
			0.05	3.89 (-0.41)	10.62	23.8
PB8	108	0.01	4.72	10.62	23.8	
			0.03	4.30 (-0.42)	10.62	23.8
			0.05	3.89 (-0.41)	10.62	23.8

Le stress d'eau quotidien porté dans le tableau précédent dépend de la transpiration, qui dépend à son tour du développement de la surface foliaire. Il dépend donc de la valeur de LAI maximal que l'on a introduite. Si nous comparons les résultats de la simulation de l'effet de WSFY dans le cas où l'on utilise les données de la documentation où LAI maximal est égal à 5 (DOC), avec ceux obtenus à Barinas (BAR) où LAI maximal est égal à 2.6, nous voyons que l'effet de passer de WSFY de 0.01 à 0.05 est moindre pour les données d'après BAR que d'après DOC (Tableau A 14.26).

**TABLEAU A 14.26. EPIC ANALYSE DE SENSIBILITE POUR WSFY  
COMPARAISON DES RESULTATS DE LA SIMULATION  
POUR DONNEES D'ENTREE D'APRES DOC ET BAR  
(BARINAS DEC 89-AVR 90 PB8 270)**

WSFY	GRAINS DOC T/Ha	GRAINS BAR T/Ha
0.01	4.72	2.73
0.05	3.89(-0.83)	2.44(-29)

DOC D'après la documentation de EPIC  
BAR D'après les données de Barinas

#### EPIC : Données WA ET HI

Ces deux données d'entrée sont directement en relation avec les résultats de production de matière sèche et de grains.

WA se réfère au facteur de conversion d'énergie de radiation en matière sèche. D'après la documentation de EPIC, pour le maïs il est de 4 g/MJ par m<sup>2</sup>, selon CERES, il est de 5 g/MJ par m<sup>2</sup>, d'après CARBERRY et al (1989), il est de 3.4 g/MJ par m<sup>2</sup>, et selon nos résultats à Barinas, il est de 3.76 g/MJ par m<sup>2</sup> (Tableau A 14.27).

HI est la donnée d'entrée que l'on appelle habituellement "harvest index", qui est égale à la relation grains/biomasse aérienne de la culture.

TABLEAU A 14.27. EPIC ANALYSE DE SENSIBILITE POUR WA ET HI  
(BARINAS DEC 89-AVR 90)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	WA g/MJ	GRAINS T/Ha	BIOMASSE PA T/Ha	GRAINS/PA <sup>1</sup>
PB8	270	3.50	4.12	9.28	0.444
		3.76	4.43 (+0.31)	9.98 (+0.70)	0.444
		4.00	4.72 (+0.29)	10.62 (+0.64)	0.444

WA affecte directement le résultat de la production de biomasse et l'effet sur la production de grains est proportionnel à l'effet sur la biomasse (Tableau A 14 27). Nous observons l' effet de cette donnée d'entrée sur les résultats de simulation de biomasse et de grains pour les conditions édapho-climatiques de Barinas. Si on applique la valeur de WA expérimentale (3.76) ou celle de la documentation (4.0), il se produit une différence de simulation d'environ 0.7 T/Ha dans la production de matière sèche.

		HI Kg/Kg*	GRAINS T/Ha	BIOMASSE PA T/Ha
PB8	270	0.4	3.79	10.62
		0.5	4.72 (+0.93)	10.62
		0.6	5.64 (+0.92)	10.62

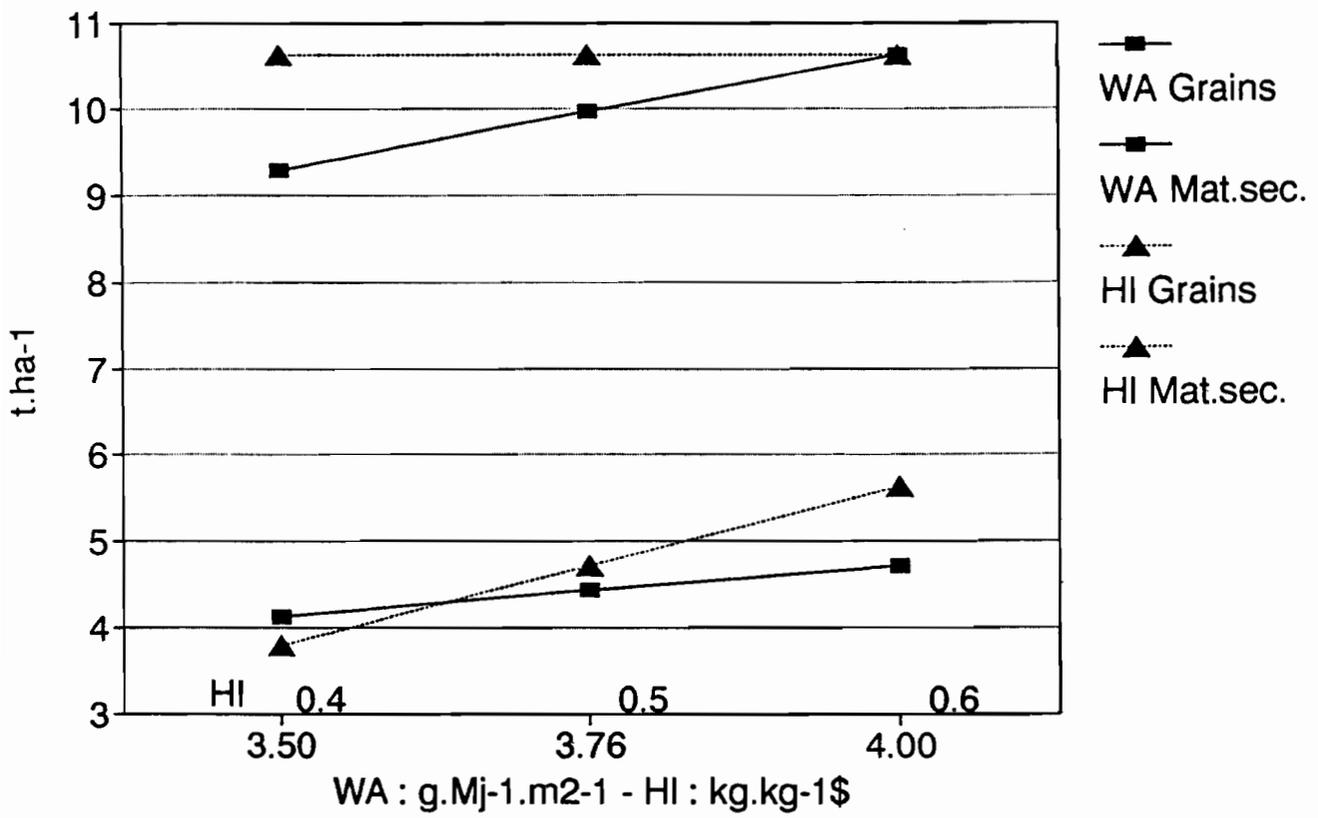
<sup>1</sup> PA = matière sèche de la partie aérienne  
\* Kg grains / Kg matière sèche partie aérienne

Selon les algorithmes de EPIC, HI affecte uniquement le résultat de la production de grains sans altérer le résultat de la production de biomasse (Tableau E.7.). Nous pouvons observer quelle est la sensibilité de cette donnée d'entrée pour les conditions édapho-climatiques simulées ici. Entre la valeur de HI expérimentale (0.42) et celle de la documentation (0.50), il peut se produire une différence de simulation d'environ 1 T/Ha dans la production de grains.

### Conclusions des analyses effectuées sur les données de EPIC

Pour EPIC, WA, HI y DMLA constituent des données d'entrée dont l'influence est aussi importante sur les résultats de la production de grains et de biomasse, que le sont pour CERES les données d'entrée, G2 et G3 pour les résultats de production de grains.

EPIC : PRODUCTION DE M.S. ET DE GRAINS  
 EN FONCTION DE WA ET HI



### 3.3.3. NCSWAP

Pour NCSWAP on a pu produire expérimentalement 12 des 16 données requises.

TABLEAU A 14.28. DONNEES D'ENTREE DE LA PARTIE AERIENNE VARIABLE ET MARGE DE VARI POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE

DONNEE	DEFINITION ET UNITE	VARIÉTÉ	VALEUR BASE	MARGE	PAS DE LA VARIATION
DWHA et YMHA	Production potentielle de Mat.sec(0% H2O) et de grains à la densité de la culture de référence (40000 plantes/Ha) Unité : (kg.ha-1) (CV estimé à 10% dans la détermination expérimentale de cette valeur)	PB8	4790	5168-6168	500
PPOP	Densité actuelle de la culture (plantes/Ha) (CV estimé à 10% dans la détermination expérimentale de cette valeur)	PB8	40000	32000-40000	4000
DDP	Nb.de jours entre émergence et pollinisation (l'erreur dans la détermination expérimentale estimée à 1 jour)	PB8	54	53-54	1
DDM	Nb.de jours entre émergence et maturité physiol. (l'erreur dans la détermination expérimentale estimée à 1 jour)	PB8	106	104-106	1
SENESE	Nb. de jours antérieurs à la maturité physiologique où commence la sénescence (l'erreur dans la détermination expérimentale estimée à 1 jour)	PB8	34	33-34	1
IFCDAY	Nb. de jours entre émergence et "full canopy" (l'erreur dans la détermination expérimentale estimée à 1 jour)	PB8	54	53-55	1
PEREVAP	Fraction de l'évapotranspiration qui s'évapore à "full canopy"		0.32	0.0-0.32	0.1

## NCSWAP : COURBES DE CROISSANCE RELATIVE

Les coefficients des courbes de croissance relative de la biomasse aérienne et des grains, constituent les données de la plus grande importance pour la simulation de la production de biomasse et de grains pour NCSWAP. Cette évidence mérite d'être soulignée encore une fois avant de passer en revue l'influence respectives des autres données d'entrée.

### NCSWAP: Données DWHA ET YMHA

DWHA et YMHA sont les données d'entrée qui se réfèrent à la production potentielle de biomasse aérienne et de grains. Dans les algorithmes, ils se convertissent en un facteur de proportionnalité, comme le reflète l'analyse de sensibilité (Tableau A 14.29.).

TABLEAU A 14.29. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR DWHA ET YMHA  
RESULTATS DE LA SIMULATION (BARINAS. ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	DWHA t.ha-1	GRAINS t.ha-1	BIOMASSE PA t.ha-1	DEFIC H2O cm	TRANSP cm	GRAINS/PA POTENTIEL	GRAINS/PA SIMULE
PB8	270	12,13 (-1)	3.96 (+0,02)	9.97 (-0,78)	2.958	14.98	0.395	0.397
		13,13	3.94	10.75	2.958	14.98	0.365	0.367
		14,13 (+1)	3.93 (-0,01)	11.52 (+0.77)	2.958	14.98	0.339	0.341
	108	12,13 (-1)	3.96 (+0,02)	9.97 (-0,78)	2.709	13.45	0.395	0.397
		13,13	3.94	10.75	2.709	13.45	0.365	0.367
		14,13 (+1)	3.93 (-0,01)	11.52 (+0.77)	2.709	13.45	0.339	0.341
VARIETE	DOSE N kg.ha-1	YMHA t.ha-1	GRAINS t.ha-1	BIOMASSE PA t.ha-1	DEFIC H2O cm	TRANSP cm	GRAINS/PA POTENTIEL	GRAINS/PA SIMULE
PB8	270	4,29 (-500)	3.60 (-0,34)	10.75	2.958	14.98	0.327	0.335
		4,79	3.94	10.75	2.958	14.98	0.365	0.367
		5,29 (+500)	4.29 (+0.35)	10.75	2.958	14.98	0.403	0.399
	108	4,29 (-500)	3.60 (-0,34)	10.75	2.709	13.45	0.327	0.335
		4,79	3.94	10.75	2.709	13.45	0.365	0.367
		5,29 (+500)	4.29 (+0.35)	10.75	2.709	13.45	0.403	0.399

DWHA affecte directement les résultats de production de biomasse aérienne, et par conséquent les résultats de production de grains. La simulation calcule les stress qui affectent la production de biomasse aérienne totale, et la relation grains/PA potentielle introduite se maintient dans les résultats simulés (Tableau A 14 29).

YMHA n'affecte que production de grains simulée; c'est un facteur de proportionnalité dans le calcul de production de grains (Tableau A 14 29).

Si DWHA varie, on n'observe pas d'effet sur le déficit en eau, ni sur la transpiration de la culture simulée, bien qu'il y ait un changement dans la production de biomasse aérienne totale. Nous n'avons pas d'explication à proposer pour l'instant mais ce manque de sensibilité est inquiétant car il ne laisse pas prise à la calibration sur ce point.

Il faut signaler enfin que NCSWAP ne reflète aucune différence pour les différents traitements de N dans les résultats de la simulation présentés ici.

Dans notre cas, une différence de 1 T.ha.<sup>-1</sup> dans l'évaluation de la production potentielle de biomasse aérienne produit une différence de 0.78 T.ha.<sup>-1</sup> dans le résultat de la simulation de cette observation. Dans le cas de la production potentielle des grains, l'effet d'une différence dans l'évaluation de 1/2 T.ha.<sup>-1</sup> produit une différence dans la simulation de 0.35 T.ha.<sup>-1</sup> pour les grains produits.

#### NCSWAP: Donnée PPOP

PPOP se réfère à la donnée d'entrée de la densité actuelle de la culture. Dans NCSWAP, il est utilisé dans deux occasions:

-premièrement pour calculer le facteur de proportionnalité (PPOPRED = densité actuelle/densité optimale) utilisé par l'algorithme pour calculer la production de biomasse totale aérienne,

-deuxièmement, pour calculer le facteur de couverture du sol, donnée nécessaire pour les calculs d'évapotranspiration.

La donnée de PPOP affecte donc directement la production de biomasse et par conséquent la production de grains (Tableau A.14.30); de même, elle intervient également dans les calculs d'évaporation et de transpiration qui affectent indirectement ceux de production de biomasse à travers le stress hydrique (Tableau A 14.30.).

TABLEAU A 14.30. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR PPOP  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N KG.HA-1	PPOP PLA/HA	GRAINS T.ha.-1	BIOMASSE PA T.ha.-1	DEFIC H2O cm	TRANSP cm	EVAP cm
PB8	270	32000	3.25	8.87	2.497	13.17	24.76
		36000 (+4000)	3.61 (+0.36)	9.84 (+0.97)	2.647	13.29	24.59
		40000 (+4000)	3.94 (+0.33)	10.75 (+0.91)	2.709	13.457	24.40

## NCSWAP : Données DDP ET DDM

La différence de plus ou moins un jour dans la durée de la pollinisation (DDP), au sein d'une durée égale du cycle de culture, n'affecte pas les résultats finaux de la simulation en ce qui concerne la biomasse aérienne, les grains, le déficit en eau et l'évapotranspiration (Tableau A 14 31).

Si varie DDM, donnée d'entrée qui se réfère au nombre de jours après lesquels se déroule la maturité physiologique après l'émergence, nous observons un très faible effet dans les résultats de production de biomasse aérienne, de production de grains et dans les résultats d'évapotranspiration totale. Cependant, bien que cet effet soit de faible amplitude (Tableau A 14 32), nous noterons que la biomasse aérienne diminue lorsque la durée du cycle de la culture augmente, contrairement à ce que l'on pourrait attendre. Cela pourrait être dû à l'effet du stress d'eau dans le calcul de la biomasse finale.

TABLEAU A 14.31. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR DDP  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N KG.HA-1	DDP (DDE*)	BIOMASSE PA T.ha.-1	GRAINS T.ha.-1	DEFIC H2O CM	TRANSP CM	EVAP CM	MAD PHYSIOL DDP*
PB8	270	53	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40	54
		54	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40	53
		55	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40	52

\* DDE = jours après l'émergence  
# DDP = jours après la pollinisation

TABLEAU A 14.32. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR DDM  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N KG.HA-1	DDM DDE*	BIOMASSE PA t.ha.-1	GRAINS t.ha.-1	DEFIC H2O CM	TRANSP CM	EVAP CM
PB8	270	104	10.79 (+0,03)	3.95	2.626	13.03	24.10
		105	10.76	3.94	2.668	13.23	24.25
		106	10.75 (-0.01)	3.94	2.709	13.45	24.40

\*DDE = jours après l'émergence

## NCSWAP: Données SENESC, IFCDAY ET PEREVAP

SENESC, IFCDAY et PEREVAP sont des données d'entrée utilisées directement pour le calcul de la transpiration.

SENESC (jour avant la maturité physiologique où commence la sénescence) permet de calculer la fraction des jours écoulés depuis le début de la sénescence, fraction qui affecte directement la transpiration.

IFCDAY (Nb. de jours après l'émergence où l'on parvient à full canopy) permet de calculer la matière sèche potentielle que l'on attend à full canopy, et le rapport entre la matière sèche aérienne produite et la matière sèche potentielle à full canopy. Ce rapport affecte le calcul de la transpiration.

PEREVAP, définie comme la fraction de l'évapotranspiration qui s'évapore à full canopy, est utilisée pour déterminer la limite supérieure de la fraction de l'évapotranspiration que l'on attend comme transpiration (1-PEREVAP) quand il n'y a pas sénescence.

TABLEAU A 14.33. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR SENESC ET IFCDAY  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N KG.HA-1	SENESC DAMF*	BIOMASSE PA T.ha.-1	GRAINS DEFIC H2O T.ha.-1	TRANS CM	EVAP CM	
PB8	270	33	10.75	3.94	2.745	13.53	24.40
		34	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40
		35	10.75	3.94	2.674	13.37	24.40
*DAMF = jours avant la maturité physiologique							
		IFCDAY DDE*	BIOMASSE PA T.ha.-1	GRAINS DEFIC H2O T.ha.-1	TRANS CM	EVAP CM	CM
		53	10.68	3.92	2.774	13.50	24.33
		54	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40
		55	10.77	3.94	2.674	13.41	24.47
*DDE = jours après l'émergence							

TABLEAU A 14.34. NCSWAP ANALYSE DE SENSIBILITE POUR PEREVAP  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, ETE 89-90)

VARIETE	DOSE N kg.ha-1	PEREVAP	BIOMASSE PA T.ha.-1	GRAINS DEFIC H2O T.ha.-1	cm	TRANS cm	EVAP cm	EVAP+TRANS cm
PB8	270	0.00	11.22	4.12	3.219	18.23	17.03	35.26
		0.01	11.25	4.12	3.004	17.56	18.14	35.70
		0.10	11.01	4.04	2.762	16.76	19.27	36.06
		0.20	10.91	4.00	2.958	14.98	21.65	36.63
		0.32	10.75	3.94	2.709	13.45	24.40	37.85

La variation de plus ou moins un jour de SENESC, affecte directement la transpiration, bien que dans une très faible mesure, et par conséquent son effet sur la production de biomasse aérienne, de grains et sur le déficit en eau est presque négligeable (Tableau A 14 33).

De même, l'effet d'une variation de IFCDAY de plus ou moins un jour est très faible sur les résultats évalués ici (Tableau A 14 33).

D'après les calculs faits en utilisant l'algorithme de CERES et d'après les données de terrain de ORDAZ (1986), on a estimé que PEREVAP dans nos conditions de culture était égal à 32%. Cependant nous avons des raisons de penser que cette valeur est trop élevée, et que PEREVAP doit être plus proche de 10%.

Les résultats de l'analyse de sensibilité pour PEREVAP (Tableau A 14 34), démontrent qu'à mesure que PEREVAP diminue, la transpiration augmente et l'évaporation diminue, comme il fallait s'y attendre. Par contre, si PEREVAP diminue, le déficit en eau augmente, ce qui devrait se manifester par une diminution de la production de la biomasse aérienne. Or ce qui se produit est le contraire. Cet effet inverse reste à expliquer.

### **NCSWAP : EVOLUTION DE LA PARTIE AERIENNE**

Nous observons qu'à partir de la pollinisation, la simulation de l'évolution de la biomasse aérienne se différencie de l'évolution obtenue sur le terrain. Il reste à déterminer si cela est dû à la façon de calculer les stress de N et/ou d'eau, ou si cela est dû à la façon de considérer la sénescence.

#### **3.3.4. Comparaison des trois modèles**

Cette comparaison portera tout d'abord sur les résultats globaux résumés. La deuxième série de comparaisons porte sur l'effet de la précision expérimentale dans l'acquisition des données d'entrée.

##### **3.3.4.1. Production de Matière sèche et de Grains**

Nous observons que les résultats des simulations de l'évolution de la biomasse aérienne pour le traitement de PB8 270 (270 Kg N/Ha) par les différents modèles, ne donnent des estimations par défaut, surtout à partir de la pollinisation et ceci pour les deux traitements de N et pour tous les modèles. NCSWAP n'utilise pas le concept d'interception de la radiation pour calculer la production de matière sèche, mais utilise une courbe de croissance relative. Du fait que, dans notre cas, les coefficients aient été ajustés à la courbe de terrain, nous pouvons remarquer que la forme de la courbe simulée par NCSWAP coïncide bien avec celle du terrain, jusqu'à la pollinisation après quoi elles divergent peut-être en raison de la manière de calculer les stress de N et/ou H<sub>2</sub>O.

Il se passera la même chose avec les résultats de la simulation de grains produits, excepté pour le cas de EPIC, si l'on utilise les données selon la documentation.

Si nous comparons les simulations de l'évolution de LAI, nous observons que CERES et EPI BAR se rapprochent assez bien des résultats de terrain.

### 3.3.4.2. Effet de la précision des données expérimentales

En ce qui concerne les données d'entrée concernant les événements phénologiques, dont les observations sur le terrain peuvent comporter une erreur de plus ou moins un jour, leur variation dans ces limites n'entraîne pas de grand effet sur les résultats de simulation de production de biomasse et/ou de grains. C'est pourquoi nous ne les mentionnerons pas dans ce tableau récapitulatif.

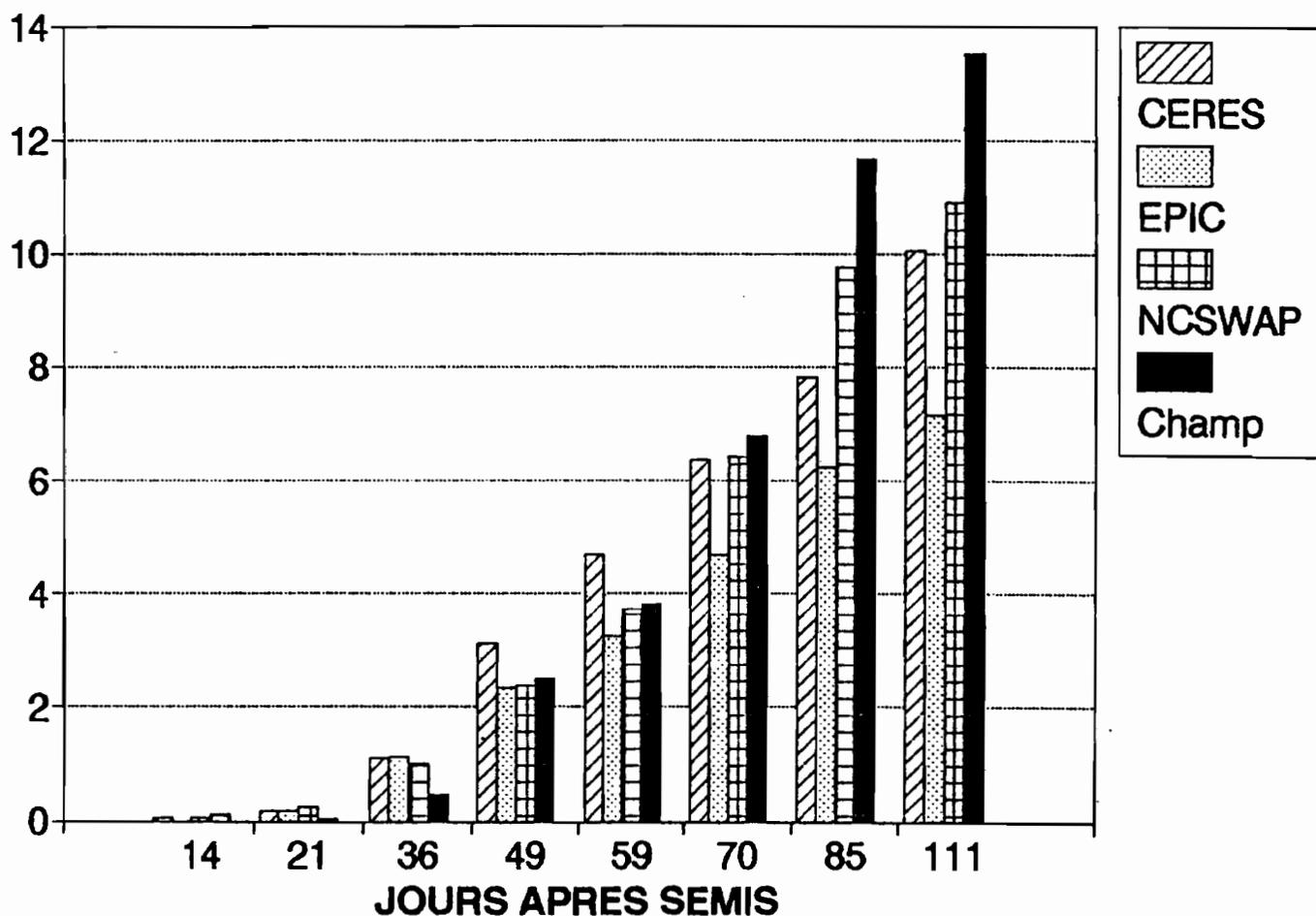
TABLEAU A 14.35. EFFET DE QUELQUES DONNEES D'ENTREE DE LA PARTIE AERIENNE DE LA PLANTE SUR LES RESULTATS DE SIMULATION

MODELE	DONNEE	UNITE	DESCRIPTION	VARIATION DE LA DONNEE	VARIATION DANS LES RESULTATS DE SIMULATION BIOMASSE PA (T.ha.-1)	GRAINS (T.ha.-1)
CERES	G2	g.plante	Nombre de grains par plante	450-500	+0.40	+0.40
	G3	mg.gr-1.j-1	Vitesse de remplissage des grains	8.75-9.25	+0.24	+0.24
EPIC	DMLA		LAI maximal	2-3	+1.48	+0.62
	DLAI		Fraction du cycle à partir duquel LAI commence à décliner	0.7-0.8	+0.77	+0.34
	WA	g/MJ.m2.-1	Conversion d'énergie de radiation en matière sèche	3.76-4.00	+0.64	+0.29
	HI		Matière sèche grains/ matière sèche PA ("harvest index")	0.4-0.5	ne varie pas	+0.93
NCSWAP	DWHA	kg.ha-1	Production potentielle de la biomasse aérienne (matière sèche)	12127-13127	+0.78	-0.02
	YMHA	kg.ha-1	Production potentielle de grains (matière sèche)	4289-4789	ne varie pas	+0.34
	PPOP	plan/Ha	Densité actuelle de plantation	36000-40000	+0.97	+0.36

Seules les données d'entrée qui ont le plus grand effet sur les résultats de la production de biomasse et de grains, pour chacun des modèles, sont rappelées dans le Tableau A14.35, dans lequel on signale, pour un seul traitement (variété PB8, dose 270 Kg N/Ha), quel est l'effet d'une variation de la donnée (de l'ordre de la marge de précision expérimentale) sur les résultats de la simulation.

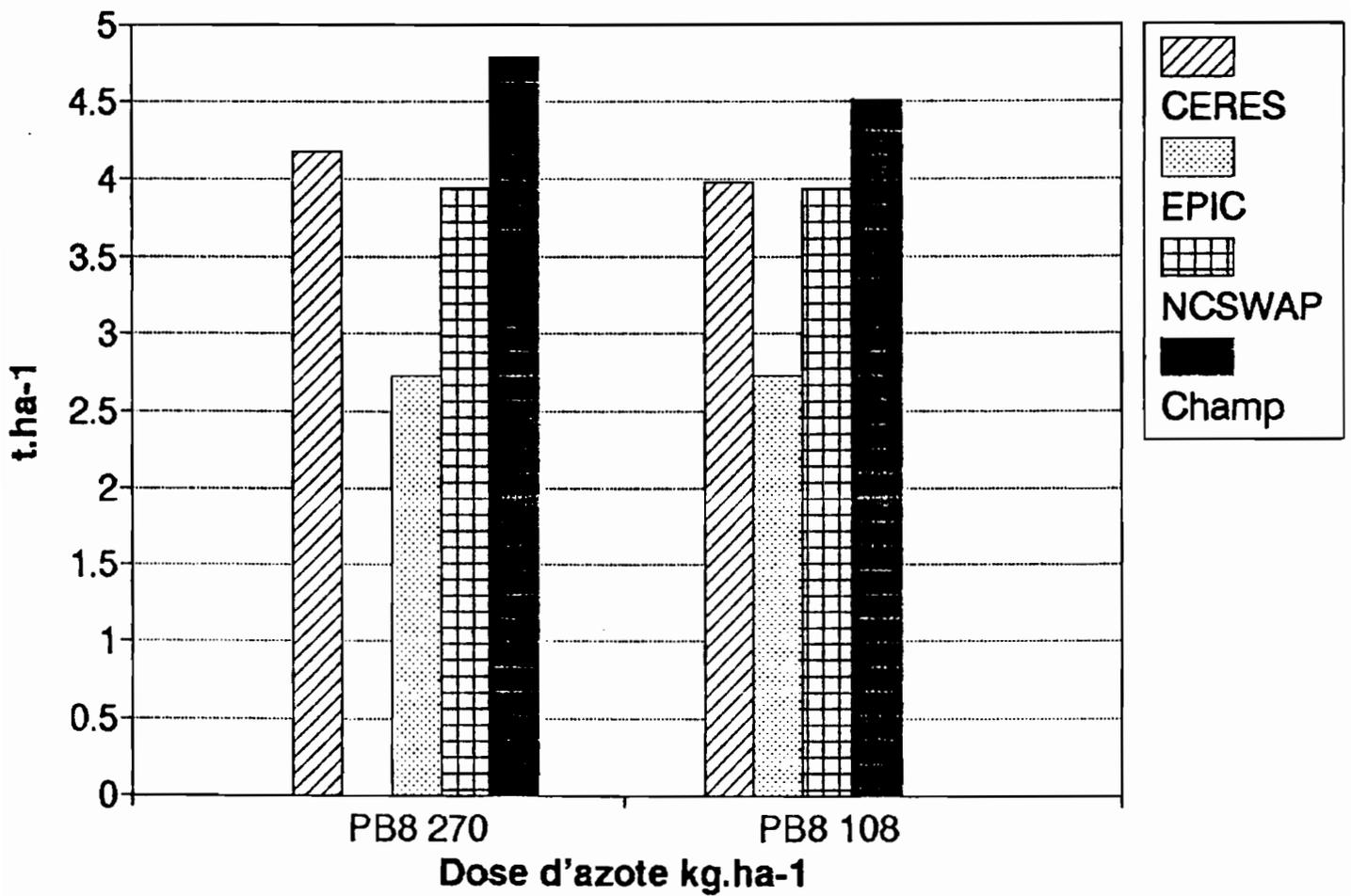
# PRODUCTION DE MATIERE SECHE PB8

## COMPARAISON CHAMP/SIMULATIONS



# PRODUCTION DE GRAINS

## COMPARAISON CHAMP/SIMULATION



### 3.3.4.3. Aptitude des modèles à simuler la production de biomasse et de grains

Tous les modèles sous-estiment la production de biomasse partie aérienne et la production de grains dans les conditions de Barinas. DELGADO (1988) rapporte déjà la même chose pour le modèle CERES à Maracay.

En outre le modèle EPIC simule un stress hydrique auquel on ne s'attendait pas. La manière d'évaluer les stress et leur effet sur les résultats de production de biomasse et de grains explique peut-être la différence entre ce qui est simulé et ce qui est observé. C'est là un point sur lequel il serait utile de revenir pour apporter des corrections indispensables.

NCSWAP simule des stress hydrique et azoté. A nouveau, la façon de calculer les stress et leurs effets pourrait expliquer les différences entre la simulation et l'observation. De plus ce modèle a besoin d'une grande quantité de données de sur le développement de la biomasse racinaire, données que nous n'avons pas encore à notre disposition au moment des essais de sensibilité. Nous n'avons donc pas d'éléments d'estimation des conséquences de ces données sur la simulation du développement de la plante.

## 4. Discussion sur la méthode employée

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'exemple de critique interne des modèles en dehors des quelques remarques provenant des auteurs dont la documentation est toujours trop sommaire quand elle existe. Il fallait donc commencer par la méthode la plus simple qui consiste à considérer isolément l'effet de chacune des données d'entrée puis éventuellement de chacun des paramètres et des coefficients numériques.

Une telle méthode a l'avantage de la simplicité et constitue une bonne approche pour prendre connaissance des modèles dans les plus infimes détails. Mais elle a l'inconvénient d'accumuler les observations sans conduire à élaborer directement des propositions de modification. En effet si l'on se limite à utiliser les deux principales données desortie à savoir la production de matière sèche et de grain dans le cas du maïs, on passe sous silence toutes les interactions et interférences qui peuvent avoir sur le résultat final autant voire plus d'importance que les valeurs des données d'entrée.

Nous sommes bien conscients de cette limitation dans la valeur de l'analyse proposée qui doit être poursuivie jusqu'à son terme. Mais la production d'un seul analyste dans le temps imparti pour le présent contrat qui constitue une première dans ce genre de travail, pouvait difficilement aller plus loin. Pour être plus productif ce genre d'analyse devrait être mené en équipe afin d'éviter la saturation.

Enfin il convient également de souligner que les résultats obtenus ne peuvent être généralisés vu que l'on a effectué l'exercice avec un seul jeu de données (seulement un sol, un climat, un cycle).

C'est pourquoi nous limiterons cette discussion à quelques points sur lesquels nous estimons pouvoir donner un avis de façon à préparer les recommandations que nous jugeons utile de donner en conclusion de cette partie du rapport consacré à la simulation de la croissance des parties aériennes du maïs en région tropicale.

## Applicabilité des algorithmes de croissance et développement de la culture

L'algorithme du modèle CERES serait sans doute le plus adéquat pour simuler le développement de la plante tant du point de vue du nombre de données d'entrée requises que de la facilité de leur obtention et de leur précision. De plus, ce même modèle utilisé comme instrument pour la détermination des coefficients génétiques (calibration) à partir d'une expérience de référence, sert ensuite pour effectuer des simulations d'expériences ultérieures en vue de la validation (HODGES et al 1987, LIU et al 1989, CARBERRY et al 1989). Son désavantage est qu'il sert uniquement pour simuler le maïs et quelques autres plantes cultivées dont on connaît bien le développement phénologique.

L'algorithme de EPIC peut être appliqué à n'importe quelle culture, vu qu'il se base fondamentalement sur la détermination de la courbe de LAI. Mais la détermination expérimentale de cette courbe est plutôt fastidieuse et doit être mise au point pour les fourrages dont on connaît mal la réaction des biomasses racinaires à la coupe et à la pâture.

La détermination de la courbe optimale de croissance relative de la matière sèche, proposée par NCSWAP, est la proposition la plus simple pour calculer la croissance de la plante et c'est également la plus facile pour déterminer celle-ci expérimentalement. Cependant, l'utilisation de cette courbe de NCSWAP est critiquable en ce qu'elle ne considère pas les effets des changements de la radiation solaire quotidienne sur la production de matière sèche. Et si la courbe s'exprime en fonction de jours (au lieu de degrés-jours), elle ne considère pas non plus les effets des changements quotidiens de température de l'air, excepté pour les calculs de stress par température. Mais il faut faire remarquer que dans nos conditions tropicales, la radiation moyenne mensuelle et la température moyenne mensuelle varient très peu d'une année à l'autre. Cela permet de penser que NCSWAP pourrait développer ses applications en milieu tropical, où la production dépend presque exclusivement des conditions de nutrition hydrique et minérale de la plante.

### Les effets de stress.

Faute de temps, nous avons écarté de ce travail l'objectif d'évaluer le calcul des stress et leurs effets sur les calculs de production de la biomasse et de grains. Il semblait à priori logique de penser que ces stress ne devaient pas se manifester puisque les conditions de la culture de référence les éliminaient à priori. Cependant, il semblerait, vu leur importance sur les résultats, qu'il serait bon de faire une étude comparative et plus détaillée de l'estimation des stress de N et d'eau pour les différents modèles afin de comprendre pourquoi ils semblent manifester au moment où l'on s'y attend le moins en effet important sur le développement des parties aériennes et la production de grains.

En effet les stress hydriques que rapportent affectent le calcul de la biomasse et des grains produits. Dans notre cas, les modèles simulent ce qui suit en ce qui concerne les stress hydriques:

CERES pas de stress hydrique

EPIC PB8 270 DOC 23.8 jours de stress hydrique  
PB8 270 BAR 21.2 jours de stress hydrique

NCSWAP PB8 270 29.58 mm de déficit en eau  
PB8 108 27.09 mm de déficit en eau

## CONCLUSIONS

Avant toute utilisation des modèles de simulation en milieu tropical il sera toujours indispensable de réaliser une ou mieux plusieurs cultures de référence pour tenir compte des spécificités variétales avant de tirer aucune conclusion sur les rapports sol plante.

De ce point de vue la supériorité du modèles CERES vient de sa précision mais son champ d'application est limité à quelques plantes dont le développement phénologique est bien connu. Nous avons travaillé sur le maïs cultivé sous climat tropical chaud mais il serait probablement très intéressant d'utiliser CERES avec les variétés de blé et de maïs cultivé sous climat tropical froid en altitude.

La simplicité du modèle NCSWAP du point de vue de la simulation de la production de biomasse aérienne basée sur de simples mesures de poids sec est incontestablement un avantage qui devrait donner à ce modèle un champ d'application important en milieu tropical pour toutes les plantes pour lesquelles on ne dispose pas des connaissances suffisantes pour appliquer les méthodes préconisées par CERES.

EPIC combine apparemment la précision de CERES et la simplicité de NCSWAP en s'appuyant seulement sur des mesures de surface foliaire. En réalité ces mesures ne sont pas forcément aussi simples et précises qu'il n'y paraît surtout dans le cas des plantes fourragères.

Enfin aucun des modèles ne propose de solution en ce qui concerne le développement des plantes fourragères qu'on ne laisse en général pas se développer jusqu'à la maturité. Les courbes standard de photosynthèse sont sans grande utilité dans ces cas là et le problème doit être repensé. Cette conclusion est de portée générale mais elle est pourtant étroitement liée aux applications de la modélisation en milieu tropical dans la mesure où l'on pense que ces applications seront nécessairement liées aux problèmes de gestion des sols et de leurs réserves organiques. Si l'on pense que cette gestion passe par la promotion des rotations spontanées ou organisées, il faudra nécessairement que les progrès à faire en modélisation comportent une meilleure approche de la simulation des plantes fourragères de coupe ou de pâture.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE I.5.**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## ANNEXE I.5.

### ANALYSES DE SENSIBILITE: AZOTE DU SOL ET DE LA PLANTE

#### Table des Matières

#### Introduction

#### I.Généralités sur la modélisation de la transformation de l'azote du sol

##### 1.1. Processus considérés.

##### 1.2. Données d'entrée en rapport avec la transformation de l'azote dans le sol et son prélèvement par la plante

##### 1.3. Algorithmes qui définissent les transformations de l'azote dans le sol et son prélèvement par les plantes

##### 1.3.1. Minéralisation des résidus végétaux

###### 1.3.1.1. Selon CERES

###### 1.3.1.2. Selon NCSWAP

##### 1.3.2. Minéralisation de la matière organique du sol

###### 1.3.2.1. Selon CERES

###### 1.3.2.2. Selon NCSWAP

##### 1.3.3. Algorithmes décrivant la rhizodéposition

###### 1.3.3.1. Selon CERES

###### 1.3.3.2. Selon NCSWAP

##### 1.3.4. Algorithmes de l'immobilisation de l'azote minéral

###### 1.3.4.1. Selon CERES

###### 1.3.4.2. Selon NCSWAP

##### 1.3.5. Algorithmes décrivant la stabilisation de la matière organique dans le sol (HUMIFICATION)

###### 1.3.5.1. Selon CERES

###### 1.3.6.2. Selon NCSWAP

##### 1.3.6. Algorithmes de la nitrification

###### 1.3.6.1. Selon CERES

###### 1.3.6.2. Selon NCSWAP

- 1.3.7. Algorithmes de la dénitrification
  - 1.3.7.1. Selon CERES
  - 1.3.7.2. Selon NCSWAP
- 1.3.8. Algorithmes de l'hydrolyse de l'urée
  - 1.3.8.1. Selon CERES
- 1.3.9. Algorithmes du calcul de la demande d'azote par la plante
  - 1.3.9.1. Selon CERES
- 1.3.10. Algorithmes du calcul du prélèvement d'azote par la plante
  - 1.3.10.1. Selon CERES
- 1.4. Constantes et calculs divers
  - 1.4.1. Changements dans les pools de  $\text{NH}_4$  et  $\text{NO}_3$  pendant les calculs d'une journée
    - 1.4.1.1. Selon CERES
  - 1.4.2. Prise en compte de l'adsorption de l'ammonium
    - 1.4.2.1. Selon CERES
  - 1.4.3. Constantes utilisées dans les calculs en rapport avec l'Azote
    - 1.4.3.2. Selon CERES
- 1.5. Analyses de sensibilité concernant l'azote
  - 1.5.1. Expérience de terrain
  - 1.5.2. Données utilisées
  - 1.5.3. Analyses de sensibilité
    - 1.5.3.1. CERES: Poids des résidus de surface (STRAW)
    - 1.5.3.2. CERES: C/N des résidus de surface (SCN)
    - 1.5.3.3. CERES: Profondeur d'incorporation des résidus P.A. (SDEP)
    - 1.5.3.4. CERES: Poids des racines de la culture antérieure (ROOT)
    - 1.5.3.5. CERES: % C organique par horizon (OC)
    - 1.5.3.6. CERES: Ajustement de la minéralisation de l'humus (DMOD)
    - 1.5.3.7. CERES: pH par horizon
    - 1.5.3.8. CERES:  $\text{NH}_4$  et  $\text{NO}_3$  initial dans les horizons 1 et 2 sans fertilisation
    - 1.5.3.9. CERES:  $\text{NH}_4$  et  $\text{NO}_3$  initial dans les horizons 1 et 2 avec fertilisation
    - 1.5.3.10. CERES: quantité d'urée ajoutée (en une fois) le jour du semis (AFERT)
    - 1.5.3.11. CERES: sulfate d'ammonium ou urée (IFTYPE)

## CONCLUSIONS

## INTRODUCTION

L'objectif de cette annexe est de rendre compte des évaluations des modèles de CERES-MAIS, NCSWAP et accessoirement EPIC du point de vue des processus de transformation de l'Azote du sol et de son extraction par une culture de maïs, en ce qui concerne:

- les résultats de la simulation pour le prélèvement d'azote
- l'effet de la fertilisation fractionnée
- les résultats de la simulation de l'Azote minéral et organique du sol
- la disponibilité et la précision des données d'entrée en rapport avec les transformations du N du sol

Le sol de Barinas possède un faible contenu en matière organique (0.7 % de C et 0.06 % de N dans l'horizon 0-30 cm), ce qui pourrait être considéré comme un signe de fragilité. Dans le contexte du Vénézuéla il est cependant considéré comme l'un des sols les plus productifs.

On sait que sous l'effet du labourage, il se produit une plus grande minéralisation de la matière organique du sol. On sait aussi que l'addition de fertilisant azoté entraîne l'extraction d'une plus grande quantité de N provenant du sol par la plante. On pourrait s'attendre donc à ce que sous un régime de culture continue (avec labourage et fertilisation-N), il se produise une perte de la capacité productive de ce sol, soit par perte de structure, soit par diminution du stock du N organique à la disposition de la plante. En réalité cette minéralisation accrue est sans doute, en partie au moins, compensée dans certaines situations édapho-climatiques par une activité photosynthétique plus intense qui accroît la rhizodéposition (GREENLAND et al. 1992). En tout cas les exploitants de la région ne se sont pas encore plaint d'avoir observé des baisses significatives et systématiques de rendement après dix ou douze ans de culture de maïs. De telles baisses de rendements ont été observées dans la région maïs sur des sols alluviaux plus jeunes situés en aval de la Série Barinas.

Le présent projet se basait sur l'idée que l'utilisation des modèles actuels de simulation de systèmes sol-plante incluant le cycle de l'Azote, pourrait se convertir en instrument d'évaluation de l'effet des cultures sur les réserves d'Azote du sol.

Pour le système qui nous concerne, à savoir le cycle de culture du maïs à l'échelle d'une parcelle, les modèles CERES, EPIC et NCSWAP présentent, en rapport avec leurs objectifs spécifiques, des propositions différentes en ce qui concerne les données d'entrée requises et les algorithmes utilisés pour représenter les transformations de l'Azote du sol et l'évolution de son prélèvement par la plante:

- CERES: évaluer le développement phénologique et la production des variétés de maïs
- EPIC: évaluer la perte de fertilité sous l'effet de l'érosion
- NCSWAP: intégrer les processus liés à la dynamique de l'eau et de l'azote dans le système sol-eau-plante.

Nous proposons donc de faire d'abord une étude comparative des modèles CERES, NCSWAP et EPIC, afin de déterminer si les hypothèses qu'ils proposent à travers les algorithmes utilisés en ce qui concerne les transformations du N, sont acceptables en milieu tropical, et si les données d'entrée qu'ils requièrent à cet effet, sont disponibles et sûres, en se maintenant le cadre climat-eau-sol-plante proposé par chacun d'eux.

Ensuite, nous avons réalisés avec CERES et NCSWAP quelques unes des simulations qui se prêtent à une analyse de sensibilité des données d'entrée de la même manière que ce qui a été fait pour les données parties aériennes.

Après la discussion des observations effectuées et des résultats obtenus, nous concluons par quelques recommandations pour les points qui nous paraissent suffisamment clairs et sur les recherches qui nous paraissent indispensable de poursuivre pour améliorer la modélisation du cycle de l'azote dans les sols tropicaux.

## I. Généralités sur la modélisation de la transformation de l'azote du sol

### 1.1. Processus considérés.

Dans le cycle de l'azote, on peut distinguer des processus physiques de transport et des processus biologiques ou chimiques de transformation et d'extraction par la plante. Les processus de transport sont étroitement dépendants de ceux de l'eau dans tous les modèles. Ils sont également évoqués dans l'annexe concernant la solution du sol. Il nous suffit de savoir pour l'instant que ces phénomènes de transport d'eau et donc de l'azote minéral, sont évalués par ces modèles

uniquement dans le sens vertical sans tenir compte de la diffusion latérale. Dans le cadre de cette annexe, notre analyse se centrera sur les processus biologiques ou chimiques représentés dans les différents modèles. Dans le Tableau A 15.1., on présente un résumé des processus du cycle de l'azote pris en compte par les modèles CERES, EPIC et NCSWAP.

TABLEAU A.15.1.

PROCESSUS DU CYCLE DE L'AZOTE CONSIDERES DANS LES MODELES

PROCESSUS	CERES	NCSWAP	EPIC
Minéralisation de résidus végétaux	+	+	+
Minéralisation de la MOS labile et/ou	+	+	+
Minéralisation de la MOS résistante	+	+	+
Immobilisation de N minéral	+	+	+
Humification de N des résidus végétaux	+	+	+
Nitrification	+	+	+
Dénitrification	+	+	+
Fixation biologique de N <sub>2</sub>	-	+	+
Volatilisation de l'ammonium	-	-	-
Echange ou adsorption de ammonium	-	+	-
Fixation d'ammonium par les argiles	-	+	-
Hydrolyse de l'urée	+	-	-
Rhizodéposition	+	+	-
Croissance et mort de la biomasse microbienne	-	+	-
Demande de N par la partie aérienne de la plante	+	+	+
Demande de N par la racine	+	-	-
Extraction de N par les racines	+	+	-
Transport de l'azote par l'eau	+	+	+
Pertes de MOS par érosion	-	-	+

+ = considéré, - = non considéré

MOS = matière organique du sol

1 CERES ne différencie pas la MOS entre labile et résistante  
Il l'appelle humus

## 1.2. Données d'entrée en rapport avec la transformation de l'azote dans le sol et son prélèvement par la plante

Dans le Tableau A.15.2., on présente les données d'entrée requises par CERES et NCSWAP en relation avec les processus de changement de l'azote dans le système sol-eau-plante. Pour les données du sol, on divise le profil considéré en horizons, et on introduit la donnée correspondante par horizon, en présumant l'uniformité de l'horizon.

TABLEAU A.15.2.

DONNEES D'ENTREE EN RAPPORT AVEC LE N  
POUR LES MODELES CERES, ET NCSWAP

CERES	NCSWAP
Facteur d'ajustement de la vitesse de minéralisation de l'humus par protection chimique ou physique	Code de la texture du sol
Poids des résidus à la surface	Date d'incorporation des résidus
Profondeur d'incorporation des résidus de la superficie	Profondeur d'incorporation des résidus
C/N des résidus de la superficie	Contenu en C dans la partie labile des résidus
Poids des racines de la culture antérieure	Contenu en C dans la partie récalcitrante des résidus
% de C organique par horizon	C/N des résidus
pH par horizon	Constante de décomposition de la portion labile des résidus
concentration de N-NH <sub>4</sub> initiale par horizon	Constante de décomposition de la partie récalcitrante des résidus
Concentration de N-NH <sub>3</sub> initiale par horizon	Fraction de 15N par rapport au N total des résidus
Fertilisation minérale de N dates quantité profondeur type de fertilisant	

TABLEAU A.15.2. (suite)  
 DONNEES D'ENTREE EN RAPPORT AVEC LE N  
 POUR LES MODELES CERES, ET NCSWAP

CERES

NCSWAP

Concentration  
 initiale de N-NH<sub>4</sub>  
 soluble+échangeable  
 par horizon

Concentration de  
 N-NO<sub>3</sub> initiale par  
 horizon

Concentration d'urée  
 initiale par horizon

Concentration de N-org  
 labile dans le pool I  
 (biomasse microbienne)  
 par horizon

Concentration de N-org  
 récalcitrante dans le  
 pool I (biomasse micro-  
 bienne) par horizon

C/N du pool I (biomasse  
 microbienne) par horizon

Concentration de N-org  
 labile dans le pool II  
 (NO active) par horizon  
 Concentration de N-org  
 récalcitrante dans le  
 pool II (NO active) par  
 horizon

C/N du pool II (NO  
 active) par horizon

Fraction de N-NH<sub>4</sub>  
 soluble par rapport au  
 N-NH<sub>4</sub> soluble + N-NH<sub>4</sub>  
 interchangeable par  
 horizon

Vitesses de la nitrification de l'azote-NH<sub>4</sub> pour 4 étapes du cycle de la culture par horizon

Intervalle de jours pour chaque étape de la nitrification

Fraction de 15N par rapport au N total de chaque pool: N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>3</sub>, N pool I labile, N pool I récalcitrant, N pool II labile, N pool II récalcitrant par horizon

Fraction d'eau à saturation où se produisent simultanément la nitrification et la dénitrification au-delà de la capacité au champ

Facteur de réduction de la nitrification au moment où se produisent la nitrification et la dénitrification

Facteur de réduction de la dénitrification au moment où se produisent la nitrification et la dénitrification

TABLEAU A.15.2. (suite)  
 DONNEES D'ENTREE EN RAPPORT AVEC LE N  
 POUR LES MODELES CERES, ET NCSWAP

CERES

NCSWAP

Constante de la vitesse  
 de dénitrification à saturation

Code de la qualité du  
 drainage dans le profil

Réduction pour le flux  
 d'azote soluble

Fertilisation azotée, dates  
 quantité de N-NH<sub>4</sub> et N-NO<sub>3</sub>  
 Profondeur Proportion de 15N

Fertilisation organique  
 requiert les mêmes données que pour  
 les résidus

Contenu en N-NH<sub>4</sub> et N-NO<sub>3</sub> des eaux  
 qui pénètrent par pluie  
 et/ou irrigation

Fraction de N dans la partie  
 aérienne pour diverses dates du  
 cycle de culture

Rapport de N racine/N  
 partie aérienne pour les mêmes  
 dates où se mesure la teneur en N  
 dans la partie aérienne

Augmentation de la biomasse  
 racinaire par jour correspondant à  
 la rhizodéposition

\* outre ces données d'entrée, NCSWAP requiert la sélection de 9 conditions (switches) pour la réalisation des calculs en rapport avec de N:

- 1 Prélèvement d'azote sans limite pour la plante ou Prélèvement d'azote dépendant de la disponibilité de N dans le sol
- 2 on considère ou non les données de 15N
- 3 on considère ou non les transformations du C et de l'azote dans le sol
- 4 transport ou non de N min par mass flow
- 5 transformations de l'azote dans le sol: par segment - uniforme dans plusieurs segments
- 6 stress de N qui affecte la croissance de la plante: relation entre Prélèvement d'azote actuel et N demandé - déviation entre concent et concentration de la référence (†)
- 7 Prélèvement d'azote limité par la quantité de racines dans le segment - Prélèvement d'azote ne dépend pas de la quantité mais de la dans le segment
- 8 Prélèvement d'azote limité par: disponibilité d'eau et concentration actuelle de N - évapotranspiration et concentration actuelle de
- 9 fixation sybiotique de N - non fixation sybiotique de N

### 1.3. Algorithmes qui définissent le prélèvement de l'azote et les transformations de l'azote dans le sol

Dans ce travail, nous ne prétendons pas donner la séquence des algorithmes dans le programme global de chaque modèle, ce qui s'est déjà fait dans ZUVIA (1989), mais on essaiera de présenter séparément l'algorithme de chaque processus afin de le comparer avec les algorithmes équivalents des autres modèles.

Dans le cas de NCSWAP, nous ne considérons pas les possibilités de l'utilisation du  $^{15}\text{N}$ , la fixation symbiotique de l'azote, le contenu d'azote de la pluie, l'eau de la nappe phréatique, l'incorporation des résidus par le labourage durant le cycle de culture.

#### 1.3.1. Minéralisation des résidus végétaux

##### 1.3.1.1. Selon CERES

CERES fait la distinction, parmi les résidus végétaux de la culture antérieure, entre résidus de surface et racines.

$$\text{SNKG} = \text{STRAW} * 0,40/\text{SCN}$$

$$\text{RNKG} = \text{ROOT} * 0,40/\text{RCN}$$

RCN	relation C/N des résidus racines, fixée à 40
RNKG	N présent dans les résidus racines (Kg/Ha)
ROOT	donnée d'entrée du poids des résidus racines (Kg/Ha)
SCN	donnée d'entrée du rapport C/N des résidus de surface
SNKG	N présent dans les résidus de surface (Kg/Ha)
STRAW	donnée d'entrée du poids des résidus de surface (Kg/Ha)
0.40	on présume que la teneur de C de la matière sèche est 40 %

Au début du programme, il calcule les contenus en N des résidus de surface et des racines et constitue les pools initiaux de matière organique fraîche (FOM(I)) et de N dans la matière organique fraîche (FON(I)) pour chaque horizon, avec les résidus de surface et de racines présent dans les horizons correspondants:

```

FOM I = ROOT * FACTOR
FOM I = FOM I + ADD

FON I = RNKG * FACTOR
FON I = FON I +(ADD * 0,40/SCN)

FACTOR = WRN I /WSUM
WRN I = exp(-3.0 * DEPTH/DEPMAX)

ADD      = STRAW * FR
FR       = DLAYR I /SDEP

```

```

ADD      poids du résidu superficiel dans l'horizon (kg.ha-1)
DEPTH    profondeur de la limite inférieure de l'horizon I (cm)
DEPMAX   profondeur maximale du profil considéré (cm)
DLAYR(I) épaisseur de l'horizon I (cm)
FACTOR   fraction de l'azote des résidus racinaires dans
          l'horizon I
FOM(I)   matière organique fraîche, MOF, dans l'horizon I
          (kg.ha-1)
FON(I)   N de la MOF dans l'horizon I (kg.ha-1)
FR       rapport entre profondeur d'enfouissement des résidus de
          surface et épaisseur de l'horizon I
RNKG     N total présent dans les résidus racines (kg.ha-1)
ROOT     donnée d'entrée du poids des résidus racines (kg.ha-1)
SCN      donnée d'entrée du rapport C/N des résidus de surface
SDEP     profondeur d'enfouissement des résidus de surface (cm)
STRAW    donnée d'entrée du poids des résidus de surface
          (kg.ha-1)
WRN(I)   contenu en N des résidus racines présents dans l'horizon
          I
WSUM     somme de WRN(I) pour tous les horizons
0.40    on présume que 40 % de la matière sèche est de C
-3.0    facteur non justifié

```

Ensuite, il divise le pool initial de FOM(I) de chaque horizon en trois pools, qui correspondent au contenu en hydrates de carbone (20%), en cellulose (70%) et en lignine (10%):

$$\begin{aligned} \text{FPOOL}(I,1) &= \text{FOM}(I) * 0.20 \\ \text{FPOOL}(I,2) &= \text{FOM}(I) * 0.70 \\ \text{FPOOL}(I,3) &= \text{FOM}(I) * 0.10 \end{aligned}$$

FOM(I) matière organique fraîche présente dans l'horizon I (kg.ha-1)  
 FPOOL(I,J) J = 1 hydrates de carbone dans l'horizon I (kg.ha-1)  
 J = 2 cellulose dans l'horizon I  
 J = 3 lignine dans l'horizon I (kg.ha-1)

CERES calcule quotidiennement la diminution du pool de matière organique fraîche (FOM(I)) et la variation du pool de N dans la matière organique fraîche (FON(I)). On évalue la décomposition pour chaque composante de FOM(I) (hydrates de carbone, cellulose et lignine) et on fait la somme en GRCOM. La variation de FON(I) dépend de la libération brute de N de FON(I) proportionnellement à la décomposition de FOM(I), et de l'immobilisation de N en fonction des besoins de la biomasse pour réaliser cette décomposition. On calcule pour chaque horizon:

$$\begin{aligned} \text{FOM}(I) &= \text{FOM}(I) - \text{GRCOM} \\ \text{FON}(I) &= \text{FON}(I) + \text{RNAC} - \text{GRNOM} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{GRCOM} &= \text{GRCOM} + \text{G1} * \text{X} * \text{FOM}(I) \\ \text{GRNOM} &= \text{GRNOM} + \text{G1} * \text{X} * \text{FON}(I) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{G1} &= \text{TF} * \text{MF} * \text{CNR} * \text{RDECR}(J) \\ \text{X} &= \text{FPOOL}(I,J) / \text{FOM}(I) \end{aligned}$$

$$\text{TF} = (\text{ST}(I) - 5.0) / 30.0$$

$$\begin{aligned} \text{CNR} &= \exp(-0.693 * (\text{CNR} - 25) / 25.0) \\ \text{CNR} &= (0.4 * \text{FOM}(I)) / (\text{FON}(I) + \text{TOTN}) \\ \text{TOTN} &= (\text{SNO3}(I) + \text{SNH4}(I) - 0.5) / \text{FAC}(I) \end{aligned}$$

$$\text{FPOOL}(I,J) = \text{FPOOL}(I,J) - \text{FPOOL}(I,J) * \text{G1}$$

$$\text{RNAC} = \text{minimum}(\text{TOTN}, \text{GRCOM} * (0.02 - \text{FON}(I) / \text{FOM}(I)))$$

CNR rapport C/N entre les 40% de FOM(I) et le N total calculé comme la somme de FON(I) et de l'azote minéral disponible avant la décomposition

CNRF facteur qui dépend de la relation C/N du C dans FOM(I) et de l'azote total disponible pour la décomposition (0 - 1) (la valeur de 25 se rapporte à la valeur de C/N requise pour produire une minéralisation nette < 30 )

FAC(I) facteur de conversion de l'azote de kg.ha-1 à g.t-1 pour chaque horizon

FOM(I) matière organique fraîche présente dans l'horizon I (kg.ha-1) après la décomposition

FON(I) N contenu dans la matière organique fraîche présente dans l'horizon I (kg.ha-1) après la décomposition

FPOOL(I,J) J = 1 hydrates de carbone dans l'horizon I (kg.ha-1)  
 J = 2 cellulose dans l'horizon I  
 J = 3 lignine dans l'horizon I

G1 qui s'actualise par la décomposition (kg.ha-1)  
 constante de vitesse de décomposition de chaque composante de FOM(I), qui dépend de la constante respective de vitesse maximale de décomposition, de la température du sol, de l'humidité du sol et de la disponibilité de N

GRCOM C total libéré par la décomposition brute de chaque composante de FOM(I): hydrates de carbone, cellulose et lignine; dans ce cas la quantité de FOM(I) utilisée dans le calcul est celle d'avant la décomposition

GRNOM N brut total libéré par la décomposition de chaque composante de FOM(I); la valeur de FON(I) utilisée est celle du jour antérieur

MF fraction d'eau disponible dans l'horizon par rapport à la disponibilité potentielle d'eau dans l'horizon

minimum fonction qui sélectionne la valeur minimale parmi les valeurs séparées par une virgule à l'intérieur de la parenthèse

RDECR(J) constante de la vitesse maximale de décomposition pour  
 J=1 hydrates de carbone = 0.2  
 J=2 cellulose = 0.05  
 J=3 lignine = 0.0095 par jour

RNAC immobilisation brute de N par la biosynthèse des micro-organismes qui participent à la décomposition, au minimum le N minéral disponible et au maximum le N minéralisable

SNH4(I) N-NH4 dans l'horizon I (kg.ha-1)

SNO3(I) N-NO3 dans l'horizon I (kg.ha-1)

ST(I) température du sol à l'horizon I

TF facteur qui dépend de la température du sol (la valeur de 5°C est le minimum pour le démarrage de l'activité microbienne et celle de 30°C l'optimum)

TOTN N minéral disponible; on présume qu'il doit rester un minimum de 0.5 mg.kg<sup>-1</sup> de N minéral sans immobilisation

X fraction de la composante (hydrates de carbone, cellulose ou lignine) dans FOM(I) avant la décomposition

0.02 facteur pour déterminer la quantité de N du produit de la décomposition qui sera utilisée par les micro-organismes pour produire cette décomposition  
 $0.02 = 0.4 * 0.4 * 0.125$   
 40% de FOM(I) est de C  
 40% du C produit par la décomposition est utilisé pour la biosynthèse des micro-organismes (efficacité d'utilisation du substrat, voir LADD et al 1992)  
 $0.125 = N/C$  des micro-organismes (C/N = 8)

NOTE: dans la version 1, on calculait la décomposition de FOM en faisant varier les constantes de rapidité maximum de décomposition selon le rapport

FOM actuel / FOM initial

Elle diminuait selon l'ordre

>=0.8	hydrates de carbone	k=0.8
<0.8 et >=0.2	cellulose	k=0.05
<0.2	lignine	k=0.0095

tandis que dans la version 2 on fait trois pools qui tous trois se décomposent chaque jour.

1.3.1.2. Selon NCSWAP

NCSWAP fait la distinction, tant au niveau des données d'entrée que pendant les calculs concernant les résidus de la plante qui passent au sol durant la simulation entre:

partie aérienne  
 racines  
 rhizodéposition

aussi bien des résidus de la culture antérieure que de la matière organique appliquée comme fertilisant.

Dans l'agencement des données d'entrée qu'il utilise pour gérer les résidus, il autorise un maximum de 15 types de résidus et un minimum de 9, dont la distribution est la suivante:

1	résidus de la partie aérienne
2,3,4,5	résidus de racines
6,7,8,9	rhizodéposition
10,11,12	applications de fertilisant organique
13,14,15	résidus de la culture antérieure

En raison de la conception de l'algorithme, on présume que les résidus sont appliqués des jours différents, mais consécutifs à partir du premier jour de la simulation. Si cela est nécessaire, les applications de fertilisant organique sont traités à part.

Les données relatives aux résidus se lisent dans le fichier de données d'entrée (programme PRINCIPAL) et sont transcrites ensuite dans le fichier numéro 10, où on les relit (EXECUS3) pour agencer les données qui ont deux indices par résidu, l'un pour la fraction labile de C du résidu, l'autre pour la fraction récalcitrante.

Le programme effectue les calculs par segments de sol et non par horizons, c'est-à-dire qu'un horizon peut comprendre un ou plusieurs segments, le segment ayant une épaisseur constante et constituant l'unité de propriétés homogènes au sein de l'horizon. Cependant, pour les calculs de transformation de l'azote, les segments se regroupent en un nombre déterminé comme donnée d'entrée. Le programme ajuste donc les données d'entrée des résidus aux groupes de segments, de façon à ce que chaque groupe de segments ait des propriétés homogènes quant au N et au C (GROUPS3).

Les quantités de C labile et C récalcitrant des résidus pour chaque segment sont organisées initialement dans un agencement de double indice:

RC(J,I)	où
	J segment
	I type de résidu et type de C dans le
résidu	
	pour I impair, C est labile
	pour I pair, C est récalcitrant
	chaque deux I correspond à un type de
résidu	
	quand il n'y a pas de résidu dans le
segment,	
	RC(J,I) = 0

Ensuite, quand on regroupe les segments, on calcule pour chaque groupe de segments les quantités de C labile et de C récalcitrant en un agencement d'un seul indice correspondant au type de résidu:

CONC(I) pour I impair, C est labile  
pour I pair, C est récalcitrant  
chaque paire de I correspond à un type de résidu I >= 15

Les transformations de C et de N se ramènent à un système d'équations différentielles du premier ordre. Connaissant les valeurs initiales on peut trouver une solution numérique. Dans le programme cette solution numérique est déterminée en suivant la méthode de RUNGE-KUTTA-GILL.

Dans le cas des résidus, on calcule pour chacun d'eux et pour chaque pool du résidu (labile ou récalcitrant) un facteur qui dépend de la disponibilité en N dans le groupe de segments considérés, et qui affecte la vitesse de décomposition du pool considéré du résidu:

RTF(I) = 1.1 si CN(I) <= CN(1)  
si CN(I) <= 0

RTF(I) = 1.1 si CNRATE(I) <= 10

RTF(I) = (0.4 \* (CNRATE(I) - 20) / (-10)) + 0.7  
si 10 < CNRATE(I) <= 20

RTF(I) = (0.3 \* (CNRATE(I) - 50) / (-30)) + 0.4  
si 20 < CNRATE(I) <= 50

RTF(I) = (0.15 \* (CNRATE(I) - 80) / (-30)) + 0.25  
si 50 < CNRATE(I) <= 80

RTF(I) = (0.5 \* (CNRATE(I) - 120) / (-40)) + 0.2  
si CNRATE(I) > 80

la valeur minimale établie pour RTF(I) est de 0.2

CNRATE(I) = RED \* CF(I) \* CONC(I) / XNCN(I)

XNCN(I) = (RED\*CF(I) \* CONC(I) / CN(I)) + CONC(8) + CONC(11)

la valeur minimale établie pour XNCN(I) est de 0.001

CF(I) constante cinétique de transformation de premier ordre  
 ( $d^{-1}$ ) d'un pool d'un résidu  
 CN(1) C/N du pool I  
 CN(I) C/N d'un pool d'un résidu  
 CNRATE(I)  
 fraction de N disponible présente dans un pool d'un résidu  
 CONC(I)  
 C du pool du résidu dans le groupe de segments pour lequel  
 on fait les calculs de transformation de l'azote et du C  
 ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )  
 CONC(8)  
 N-NH<sub>4</sub> total dans le groupe de segments ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )  
 CONC(11)  
 N-NO<sub>3</sub> total dans le groupe de segments ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )  
 RED facteur de stress d'eau ou de température, correspondant  
 au plus petit des facteurs calculés (GROUPS3) par humidité  
 ou température  
 RTF(I)  
 facteur d'ajustement de la vitesse de décomposition d'un  
 pool d'un résidu qui dépend de la fraction de N disponible  
 dans ce pool I  
 XNCN(I)  
 total de N disponible pour un pool d'un résidu

NOTE: chaque groupe de deux indices correspond à un résidu, dans lequel I est la fraction labile et I+1 est la fraction récalcitrante.

Une fois que l'on a évalué RTF(I) pour les résidus, on détermine la valeur de la vitesse de transformation du C pour l'intervalle de temps considéré (dans notre cas 1 jour) en fonction de la concentration correspondante de C actuel:

$$\begin{aligned}
 \text{RATE}(I) &= -\text{RED} * \text{RTF}(I) * \text{CF}(I) * \text{CONC}(I) \\
 \text{si } \text{RATE}(I) > \text{CONC}(I) &\text{ dans ce cas } \text{RATE}(I) = \text{CONC}(I)
 \end{aligned}$$

CF(I) constante cinétique de transformation de premier  
 ordre ( $d^{-1}$ ) d'un pool d'un résidu  
 CONC(I) C du pool du résidu dans le groupe de segments pour  
 lequel on fait les calculs de transformation de l'azote et du C  
 ( $\mu g \cdot g^{-1}$ )  
 RATE(I) quantité de C qui se décompose d'un pool d'un résidu  
 durant l'intervalle de calcul ( $\mu g \cdot g^{-1} / \text{jour}$ ) dans le groupe de  
 segments (a un signe -, I=15..30)  
 RED facteur de stress d'eau ou de température, correspondant  
 au plus petit des facteurs calculés (GROUPS3) par humidité ou  
 température

CF(I)            constante cinétique de transformation de premier  
                   ordre (d<sup>-1</sup>) d'un pool d'un résidu  
 CN(1)            C/N du pool I  
 CN(I)            C/N d'un pool d'un résidu  
 CNRATE(I)       fraction de N disponible présente dans un pool d'un  
                   résidu  
 CONC(I)          C du pool du résidu dans le groupe de segments pour  
                   lequel on fait les calculs de transformation de  
                   l'azote et du C (µg.g-1)  
 CONC(8)          N-NH4 total dans le groupe de segments (µg.g-1)  
 CONC(11)        N-NO3 total dans le groupe de segments (µg.g-1)  
 RED              facteur de stress d'eau ou de température,  
                   correspondant au plus petit des facteurs calculés  
                   (GROUPS3) par humidité ou température  
 RTF(I)           facteur d'ajustement de la vitesse de décomposition  
                   d'un pool d'un résidu qui dépend de la fraction de N  
                   disponible dans ce pool I  
 XNCN(I)          total de N disponible pour un pool d'un résidu

NOTE: chaque groupe de deux indices correspond à un résidu, dans  
 lequel I est la fraction labile et I+1 est la fraction récalcitrante.

Une fois que l'on a évalué RTF(I) pour les résidus, on  
 détermine la valeur de la vitesse de transformation du C pour  
 l'intervalle de temps considéré (dans notre cas 1 jour) en  
 fonction de la concentration correspondante de C actuel:

$$\begin{aligned}
 \text{RATE}(I) &= -\text{RED} * \text{RTF}(I) * \text{CF}(I) * \text{CONC}(I) \\
 \text{si } \text{RATE}(I) > \text{CONC}(I) &\text{ dans ce cas } \text{RATE}(I) = \text{CONC}(I)
 \end{aligned}$$

CF(I)            constante cinétique de transformation de premier  
 ordre (d<sup>-1</sup>) d'un pool d'un résidu  
 CONC(I)          C du pool du résidu dans le groupe de segments  
 pour lequel on fait les calculs de transformation de l'azote et  
 du C (µg.g-1)  
 RATE(I)          quantité de C qui se décompose d'un pool d'un  
 résidu durant l'intervalle de calcul (µg.g-1/jour) dans le  
 groupe de segments (a un signe -, I=15..30)  
 RED              facteur de stress d'eau ou de température,  
 correspondant au plus petit des facteurs calculés (GROUPS3) par  
 humidité ou température

A la vitesse totale de minéralisation de l'azote, on  
 additionne aussi les vitesses de production de N minéral par la  
 décomposition des résidus:

$$\begin{aligned}
 \text{SNMIN} &= \text{SNMIN} - (\text{RATE}(I) / \text{CN}(I)) \\
 \text{RATE}(7) &= \text{SNMIN}
 \end{aligned}$$

CN(I) C/N d'un pool d'un résidu (I= 15..30)  
 RATE(I) quantité de C qui se décompose d'un pool d'un résidu  
 durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.g}^{-1}/\text{jour}$ ) (a un  
 signe -, I= 15..30)  
 RATE(7) vitesse globale de la minéralisation de N  
 ( $\mu\text{g.g}^{-1}/\text{jour}$ ) dans le groupe de segments (a un signe  
 -)  
 SNMIN vitesse totale de production de N minéral à partir de  
 l'azote organique ( $\mu\text{g.g}^{-1}/\text{jour}$ ) dans le groupe de  
 segments (a un signe -)

La quantité de N des différents résidus s'actualise à  
 partir du C et du C/N de chaque pool (RN(J,I), J segment, I un  
 pool d'un résidu, correspondent aux indices de RC(J,I),  
 $\mu\text{g.g}^{-1}$ ).

1.3.2. Algorithmes de la minéralisation de la matière  
organique du sol

1.3.2.1. Selon CERES

Au début du programme, on calcule le contenu en matière  
 organique du sol (appelée par CERES humus) et le contenu en N  
 de l'humus, par horizon, à partir de la donnée d'entrée de % C  
 organique par horizon:

$$\text{HUM}(I) = \text{OC}(I) * 1000 * \text{BD}(I) * \text{DLAYR}(I) / 0.4$$

$$\text{NHUM}(I) = \text{OC}(I) * \text{DLAYR}(I) * \text{BD}(I) * 100 - (\text{SNO3}(I) + \text{SNH4}(I))$$

BD(I) donnée d'entrée de la densité apparente par  
 horizon ( $\text{g.cm}^3^{-1}$ )  
 DLAYR(I) donnée d'entrée de l'épaisseur de l'horizon  
 (cm)  
 HUM(I) matière organique du sol (humus) dans l'horizon  
 I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ )  
 NHUM(I) N contenu dans l'humus; on présume un C/N pour  
 l'humus de 10 ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) (le C/N est celui de  
 l'humus une fois retiré l'Azote minéral)  
 OC(I) donnée d'entrée du % de C organique par horizon  
 SNH4(I) N-NH4 initial dans l'horizon I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) par  
 conversion de la donnée d'entrée NH4(I) en  
 $\mu\text{g.g}^{-1}$   
 SNO3(I) SNO3 initial dans l'horizon I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ ) par  
 conversion de la donnée d'entrée NO3(I) en  
 $\mu\text{g.g}^{-1}$   
 0.4 on présume que 40 % de l'humus est C  
 minéralisable  
 100 facteur de conversion qui comprend C/N pour  
 l'humus égal à 10

On évalue quotidiennement la minéralisation de l'humus, et on actualise les pools de HUM(I) et NHUM(I) en considérant la minéralisation de l'humus et l'humification de l'azote qui provient de la décomposition des résidus. On calcule par horizon:

$$\begin{aligned} \text{RHMIN} &= \text{NHUM}(\text{I}) * \text{DMINR} * \text{TF} * \text{MF} * \text{DMOD} \\ \text{HUM}(\text{I}) &= \text{HUM}(\text{I}) - \text{RHMIN} * 10.0 + 0.2 * \text{GRNOM} / 0.04 \\ \text{NHUM}(\text{I}) &= \text{NHUM}(\text{I}) - \text{RHMIN} + 0.2 * \text{GRNOM} \end{aligned}$$

$$\text{TF} = (\text{ST}(\text{I}) - 5.0) / 30.0$$

DMINR	constante de la vitesse de minéralisation de l'humus (0.000083 j <sup>-1</sup> *DMOD) (on re-multiplie ici par DMOD pour calculer RHMIN alors que auparavant on avait déjà multiplié par DMOD pour obtenir DNMINR).
DMOD	donnée d'entrée du facteur d'ajustement de la vitesse de minéralisation de l'humus
GRNOM	N brut total libéré par la décomposition des résidus dans l'horizon I
HUM(I)	matière organique du sol (humus) dans l'horizon I (kg.ha <sup>-1</sup> )
NHUM(I)	N contenu dans HUM(I) (kg.ha <sup>-1</sup> )
RHMIN	N minéralisé de l'humus dans l'horizon I (kg.ha <sup>-1</sup> )
ST(I)	température du sol dans l'horizon I
TF	facteur qui dépend de la température du sol (5°C est la valeur minimale et 30°C la valeur maximale fixée pour l'activité microbienne)
MF	fraction d'eau disponible dans l'horizon
0.2	on présume que 20 % de l'azote produit par la décomposition des résidus s'intègre à l'humus
10.0	on présume pour l'humus un C/N de 10
0.04	on présume que 40 % est C minéralisable et que C/N = 10

#### 1.3.2.2. Selon NCSWAP

NCSWAP organise la matière organique du sol en deux pools de transformation:

pool I      associé à la biomasse microbienne  
 pool II     associé à la matière organique active

et un pool de dépôt de la matière organique passive qui est produite à partir des pools de transformation.

Il divise à leur tour les pools I et II en deux fractions: labile et récalcitrante, qui à des fins de calculs correspondent à des compartiments différents.

Dans NCSWAP, les étapes pour calculer la minéralisation de la matière organique du sol sont les suivantes:

- lire dans le fichier d'entrée les données de concentration de N ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ ) et le C/N de:

```
pool I    labile (CONC1)
pool I    récalcitrant (CONC14)
pool II   labile (CONC6)
pool II   récalcitrant (CONC2)
```

par horizon

- transformer les concentrations de N en concentrations de C pour chaque fraction des pools et pour chaque segment du sol en utilisant le rapport C/N de chaque pool considéré comme donnée d'entrée (CN1, CN2)
- calculer la concentration de C pour chaque fraction des pools pour un groupe donné de segments (GROUPS3)
- estimer la vitesse de minéralisation pour chaque fraction des pools en fonction de la concentration actuelle de C dans les pools; ceci est nécessaire pour évaluer les changements en appliquant la méthode de RUNGE-KUTTA-GILL pour un système d'équations différentielles de premier ordre accouplées

La vitesse de minéralisation des pools de matière organique du sol se calculent selon les algorithmes suivants:

$$\text{RATE}(1) = -\text{RED} * \text{CF}(1) * \text{CONC}(1)$$

si  $-\text{RATE}(1) > \text{CONC}(1)$  alors  $\text{RATE}(1) = -\text{CONC}(1)$

$$\text{RATE}(2) = -\text{RED} * \text{CF}(2) * \text{CONC}(2)$$

si  $-\text{RATE}(2) > \text{CONC}(2)$  alors  $\text{RATE}(2) = -\text{CONC}(2)$

$$\text{RATE}(6) = -\text{RED} * \text{CFTILL} * \text{CONC}(6)$$

si  $-\text{RATE}(6) > \text{CONC}(6)$  alors  $\text{RATE}(6) = -\text{CONC}(6)$

$$\text{RATE}(14) = -\text{RED} * \text{CF}(14) * \text{CONC}(14)$$

si  $-\text{RATE}(14) > \text{CONC}(14)$  alors  $\text{RATE}(14) = -\text{CONC}(14)$

CF(1) constante cinétique de premier ordre de la  
minéralisation du pool I labile égal à  $0.332 \text{ j}^{-1}$

CF(2) constante cinétique de premier ordre de la  
minéralisation du pool II labile égal à  $0.007 \text{ j}^{-1}$

CF(14)  
constante cinétique de premier ordre de la  
minéralisation du pool I récalcitrant égal à  $0.040 \text{ j}^{-1}$

CFTILL  
constante cinétique de premier ordre de la  
minéralisation du pool II récalcitrant égal à  $0.160 \text{ j}^{-1}$

CONC(1)  
concentration de C dans le pool I labile ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )

CONC(2)  
concentration de C dans le pool II labile ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )

CONC(1)  
concentration de C dans le pool II récalcitrant ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )

CONC(1)  
concentration de C dans le pool I récalcitrant ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )

RATE(1)  
quantité de C minéralisé du pool I labile durant  
l'intervalle de calcul sans considérer l'immobilisation  
( $\mu\text{g C.g}^{-1}\text{j}^{-1}$  par gramme de sol et par jour)

RATE(2)  
vitesse de minéralisation du C du pool II labile durant  
l'intervalle de calcul sans considérer l'immobilisation  
( $\mu\text{g C.g.j}^{-1}$ )

RATE(6)  
vitesse de minéralisation du C du pool II récalcitrant  
durant l'intervalle de calcul sans considérer  
l'immobilisation ( $\mu\text{g C.g.j}^{-1}$ )

RATE(14)  
vitesse de minéralisation du C du pool I récalcitrant  
durant l'intervalle de calcul sans considérer  
l'immobilisation ( $\mu\text{g C.g.j}^{-1}$ )

RED facteur de stress d'eau ou de température, qui  
correspond au plus petit des facteurs de stress calculés  
(GROUPS3) par humidité ou température

### 1.3.3. Algorithmes décrivant la rhizodéposition

#### 1.3.3.1. Selon CERES

On actualise chaque jour le pool de FON(I) par la mort des racines dans chaque horizon:

FON(I) = FON(I) + RNLOSS  
 RNLOSS = RANC \* RTWT \* 0.05 \* PLANTS \* RLV(I)/TRL  
 seulement si TANC > TCNP  
 FON(I) N contenu dans la matière organique fraîche  
 présente dans l'horizon I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ )

PLANTS	densité de plantation (plantes/m <sup>2</sup> )
RANC	concentration de N dans les racines (g N/g racines)
RLV(I)	longueur des racines dans l'horizon I (cm.rac./cm <sup>3</sup> -1)
RTWT	matière sèche totale des racines (g/plante)
RNLOSS	N libéré par les racines dans l'horizon I (kgN.ha <sup>-1</sup> ). Le jour considéré, on calcule RNLOSS après avoir actualisé RANC et RTWT qui dépendent du prélèvement d'azote calculé le jour antérieur et RLV(I) et TRL qui dépendent de l'eau et de l'azote minéral disponible le jour considéré
TANC	concentration actuelle de N dans la partie aérienne (gN par g de partie aérienne)
TCNP	concentration critique de N dans la partie aérienne, au-dessous de laquelle la concentration de N affecte la croissance de la plante (gN par g de partie aérienne)
TRL	densité de longueur totale des racines dans le profil (cm.cm <sup>3</sup> -1)
0.05	on présume que meurent 5 % des racines par jour

#### 1.3.3.1. Selon NCSWAP

Dans NCSWAP, la rhizodéposition pendant la culture forme partie de l'organisation des résidus, et à la maturité physiologique, les racines mortes forment également partie de ce processus d'organisation. Les vitesses de décomposition quotidienne des racines se calculent comme on l'a indiqué dans le paragraphe 1.3.1.2.. Les indices des vitesses de transformation correspondantes sont les suivants:

RATE(15)	quantité de C minéralisé du pool de C labile des racines mortes durant l'intervalle de calcul (µg.g-1/jour)
RATE(16)	quantité de C minéralisé du pool de C récalcitrant des racines mortes durant l'intervalle de calcul (µg.g-1/jour)
RATE(17)	quantité de C minéralisé du pool de C labile du rhizodépôt durant l'intervalle de calcul (µg.g-1/jour)
RATE(18)	quantité de C minéralisé du pool de C récalcitrant du rhizodépôt durant l'intervalle de calcul (µg.g-1/jour)

Le programme calcule d'abord quotidiennement les changements de C et N qui se sont produits dans le sol, détermine ensuite la pénétration des racines (NCTRS3) et établit finalement l'accroissement journalier de matière dans la partie aérienne et dans les racines de la plante, ainsi que la concentration d'azote dans la partie aérienne compte tenu de l'augmentation de l'Azote total dans la plante (NCTOPS3).

A partir de l'accroissement journalier de matière sèche dans les racines de chaque segment et de la donnée d'entrée indiquant la proportion de cette croissance qui se rhizodépose, le programme actualise quotidiennement les pools de C concernant les résidus provenant de la rhizodéposition.

CPER	donnée d'entrée de la fraction de C dans la matière sèche
DELT	donnée d'entrée de l'intervalle de temps pour lesquels on fait les calculs (dans notre cas, on l'a fixé à un jour)
DLROOT	croissance de la matière des racines pour l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.j}^{-1}$ )
PERH2O	donnée d'entrée de la fraction d'eau qui existe dans la courbe de production de matière de la plante que l'on a considéré comme donnée d'entrée
RC(I,3)	pool de C labile pour le rhizodépôt dans le segment I ( $\mu\text{g.j}^{-1}$ )
RC(I,4)	pool de C récalcitrant pour le rhizodépôt dans le segment I ( $\mu\text{g.j}^{-1}$ )
ROOTF(I)	fraction de la matière accrue de racines qui se trouve dans le segment I
SLOUGH	donnée d'entrée de la fraction de la matière accrue de racines qui se rhizodépose.
0.56	fraction labile de la rhizodéposition
0.44	fraction récalcitrante de la rhizodéposition

Le programme actualise quotidiennement les pools de N qui correspondent à la rhizodéposition:

BOTN	croissance du prélèvement d'azote des racines dans le segment I ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
DTOPTON	% de N attribué à la partie aérienne par rapport à l'accroissement du Prélèvement d'azote (P.A. + Rac.)
EXUDL	portion labile de l'accroissement du prélèvement d'azote des racines qui est exsudé dans le segment I
EXUDR	portion récalcitrante de l'accroissement du prélèvement d'azote des racines qui est exsudé dans le segment I
PSU	augmentation du prélèvement d'azote total ( $\mu\text{g.j}^{-1}$ )
RN(I,3)	pool de N labile du à la rhizodéposition dans le segment I ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
RN(I,4)	pool de N récalcitrant du à la rhizodéposition dans le segment I ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
ROOTF(I)	accroissement des racines dans le segment I
SLOUGH	fraction de l'accroissement de racines rhizodéposée.
0.56	fraction labile de la rhizodéposition
0.44	fraction récalcitrante de la rhizodéposition

### 1.3.4. Algorithmes de l'immobilisation de l'azote minéral

#### 1.3.4.1. Selon CERES

On suppose qu'il n'y a immobilisation de l'azote minéral seulement dans le cas de la décomposition des résidus végétaux. Dans ce cas, est prise en compte une efficacité d'utilisation du substrat par les micro-organismes égale à 40 % pour leur propre croissance (variable RNAC, voir paragraphe 1.3.1.1.).

#### 1.3.4.2. Selon NCSWAP

Dans NCSWAP, on évalue l'immobilisation, après la calculs de minéralisation de la matière organique du sol et des résidus, pour:

- le pool I labile et le pool I récalcitrant en suivant le C
- le pool II labile, en suivant le C,
- les résidus, en suivant l'azote.

L'immobilisation de C pour les pools I labile et récalcitrant se calcule:

$$RTIMB1 = 0.56 * (EFFAC(1) * (RATE(1) + RATE(14)) + EFFAC(2) * (RATE(2) + RATE(6)))$$

$$RTIMB2 = 0.44 * (EFFAC(1) * (RATE(1) + RATE(14)) + EFFAC(2) * (RATE(2) + RATE(6)))$$

EFFAC(1)	facteur d'efficacité maximale du C libéré par les pools I labile et récalcitrant qui se recycle dans le pool I; la valeur assignée dans le programme est de 0.6
EFFAC(2)	facteur d'efficacité maximale du C libéré par les pools II labile et récalcitrant qui se recycle dans le pool I; la valeur assignée dans le programme est de 0.2
RATE(1)	C minéralisé du pool I labile dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{-1}$ )
RATE(2)	C minéralisé du pool II labile dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j-1}$ )
RATE(6)	C minéralisé du pool II récalcitrant dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j-1}$ )
RATE(14)	C minéralisé du pool I récalcitrant dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j-1}$ )
RTIMB1	quantité de C qui s'immobilise au pool I labile pendant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j-1}$ )

RTIMB2            quantité de C qui s'immobilise au pool I récalcitrant pendant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 0.56            fraction du C recyclé qui va au pool I labile  
 0.44            fraction du C recyclé qui va au pool I récalcitrant

L'immobilisation de C pour le pool II labile se calcule:

$$\text{RTIMB3} = \text{EFSINK} * (\text{RATE}(1) + \text{RATE}(14))$$

EFSINK            facteur d'efficacité maximale du C libéré par les pools I labile et récalcitrant qui s'incorpore au pool II labile; la valeur assignée dans le programme est de 0.2  
 RATE(1)          C minéralisé du pool I labile dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RATE(14)        C minéralisé du pool I récalcitrant dans l'intervalle de calcul avant d'évaluer l'immobilisation ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RTIMB3            quantité de C qui s'immobilise au pool II labile à partir des pools I labile et récalcitrant durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )

Quant à l'immobilisation due à la décomposition des résidus, il est prévu qu'elle se calcule de la façon suivante (dans le cas où EFFAC(I) des résidus = 0, l'immobilisation est nulle)

$$\begin{aligned} \text{REXBID} &= \text{REXBID} + \text{RATE}(I) * \text{EFFAC}(I) && \text{si } \text{SRESIM} < \text{AVAILN} \\ \text{REXBID} &= \text{REXBID} + \text{FRXBID}(I) * \text{CN}(1) && \text{si } \text{SRESIM} > \text{AVAILN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AVAILN} &= \text{CONC}(8) + \text{CONC}(11) + \text{SNMIN} + \text{RENIMB} \\ \text{SRESIM} &= \text{SRESIM} - \text{RESIM}(I) \\ \text{RESIM}(I) &= \text{RATE}(I) * \text{EFFAC}(I) / \text{CN}(1) \\ \text{FRXBID}(I) &= \text{AVAILN} * (\text{RESIM}(I) / \text{SRESIM}) \\ \text{RENIMB} &= \text{RTIMB1} / \text{CN}(1) + \text{RTIMB2} / \text{CN}(1) + \text{RTIMB3} / \end{aligned}$$

CN(2)

AVAILN            N disponible pour l'immobilisation ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )  
 CN(I)            C/N du pool I  
 CONC(8)          N-NH4 total dans le groupe de segments ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )  
 CONC(11)        N-NO3 total dans le groupe de segments ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )  
 EFFAC(I)        facteur d'efficacité maximale du C libéré d'un pool d'un résidu par la décomposition et qui s'ajoute au pool I  
 FRXBID(I)        fraction de l'azote disponible requis pour l'immobilisation durant la décomposition d'un pool d'un résidu

RATE(I)      quantité de C qui se décompose d'un pool d'un  
                  résidu durant l'intervalle de calcul  
                  ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RENIMB      N total qui s'immobilise dans les pools I et II  
                  durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RESIM(I)    quantité de N requis pour la décomposition d'un  
                  pool d'un résidu et qui s'immobiliserait dans  
                  le pool I durant l'intervalle de calcul  
                  ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 REXBID      N total immobilisé par la décomposition des  
                  résidus durant l'intervalle de calcul  
                  ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RTIMB1      quantité de C qui s'immobilise au pool I labile  
                  pendant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RTIMB2      quantité de C qui s'immobilise au pool I  
                  récalcitrant pendant l'intervalle de calcul  
                  ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 RTIMB3      quantité de C qui s'immobilise au pool II  
                  labile à partir des pools I labile et  
                  récalcitrant durant l'intervalle de calcul  
                  ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 SNMIN      production totale de N minéral à partir de N  
                  organique ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )  
 SRESIM      quantité totale de N requis pour la  
                  décomposition des résidus et qui  
                  s'immobiliserait dans le pool I pendant  
                  l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )

Après avoir évalué les immobilisations, on actualise les variations des quantités de C et N pendant l'intervalle de calcul, pour les différents pools:

$$\text{RATE}(1) = \text{RATE}(1) - \text{RTIMB1} - 0.56 * \text{REXBID}$$

$$\text{RATE}(2) = \text{RATE}(1) - \text{RTIMB3}$$

$$\text{RATE}(14) = \text{RATE}(14) - \text{RTIMB2} - 0.44 * \text{REXBID}$$

$$\text{RATE}(9) = -\text{YTIMOB}$$

$$\text{RATE}(7) = \text{SNMIN}$$

$$\text{RATE}(13) = \text{TIMOB}$$

$$\text{YTIMOB} = \text{CONC}(11) / \text{AVAILN} * \text{ZTIMOB}$$

$$\text{ZTIMOB} = \text{AVAILN} - \text{RAVLN}$$

$$\text{TIMOB} = \text{ZTIMOB} - \text{RENIMB}$$

$$\text{RAVLN} = \text{AVAILN} - \text{SRESIM}$$

RATE(1)	C net minéralisé du pool I labile dans l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RATE(2)	C net minéralisé du pool II labile dans l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RATE(7)	pool de l'azote total minéralisé durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RATE(9)	quantité de N-NO <sub>3</sub> immobilisé durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RATE(13)	pool de l'azote total immobilisé durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RATE(14)	C net minéralisé du pool I récalcitrant dans l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RAVLN	N potentiellement disponible après l'immobilisation
REXBID	N total immobilisé dans le pool I par la décomposition des résidus durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RTIMB1	quantité de C qui s'immobilise au pool I labile pendant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RTIMB2	quantité de C qui s'immobilise au pool I récalcitrant pendant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
RTIMB3	quantité de C qui s'immobilise au pool II labile à partir des pools I labile et récalcitrant durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{gC.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
SNMIN	production totale de N minéral à partir de N organique durant l'intervalle de calcul ( $\mu\text{g.g}^{-1}.\text{j}^{-1}$ )
TIMOB	N total immobilisé en raison de la décomposition des résidus
YTIMOB	N-NO <sub>3</sub> immobilisé par la décomposition des résidus
ZTIMOB	N total immobilisé
0.56	fraction du C immobilisé dans le pool I labile par la décomposition des résidus
0.44	fraction du C immobilisé dans le pool I récalcitrant par la décomposition des résidus

### 1.3.5. Algorithmes décrivant la stabilisation de la matière organique dans le sol (HUMIFICATION)

#### 1.3.5.1. Selon CERES

On suppose que 20 % de l'azote libéré par la décomposition de la matière organique fraîche (GRNOM minéralisation brute) passe au pool de N de l'humus (NHUM(I)). En supposant un C/N égal à 10 pour l'humus, on calcule la matière organique qui se développe dans l'humus par l'addition de ces 20 % de GRNOM libéré le jour considéré et par horizo (voir paragraphe 1.3.2.1).

En ce qui concerne la minéralisation de l'humus, il n'y a pas de facteur d'efficacité dans utilisation du substrat par les micro-organismes pour leur croissance. Cela signifie l'existence d'un équilibre impliquant le développement des populations microbiennes à partir du simple recyclage des corps microbiens.

### 1.3.6. Algorithmes de la nitrification

#### 1.3.6.1. Selon CERES

Après avoir introduit quelques variables (capacité de nitrification, facteur d'humidité, facteur de température et facteur de pH pour la nitrification, on calcule quotidiennement la nitrification:

```
SNH4(I) = SNH4(I) - RNTRF
SNO3(I) = SNO3(I) + RNTRF
RNTRF = minimum(BB, B2)
```

```
BB = A * 40.0 * NH4(I) / (NH4(I) + 90.0)
A = minimum(RP2, WFD, TF, PHN(I))
```

```
B2 = (NH4(I) - 0.5) / FAC(I)
```

```
RP2 = CNI(I) * exp(2.302 * ELNC)
      si RP2 < 0.05   RP2 = 0.05
      si RP2 > 1.0   RP2 = 1.0
```

```
1.5 PHN(I) = 1.0   si PH(I) < 6.0 PHN(I) = (PH(I) - 4.5) /
      si PH(I) > 8.0   PHN(I) = 9.0 - PH(I)
      si PHN(I) < 0.0   PHN(I) = 0
```

```
ELNC = minimum(TF, WFD, SANC)
CN(I) = RP2
CNI(I) = CNI(I) * minimum(XW, XT, SARNC)
en vue de son utilisation le jour suivant
      si CNI(I) <= 0.05   CNI(I) = 0.05
```

```
SANC = 1.0 - exp(-0.01363 * SNH4(I))
SARNC = 1.0 - exp(-0.1363 * SNH4(I))
```

```
XW = maximum(WFD, WFY(I))
XT = maximum(TF, TFY(I))
```

A	indice de la nitrification potentielle du jour, correspondant au facteur minimum parmi les facteurs de capacité de nitrification, de température, d'humidité et de pH
BB	nitrification potentielle du jour dans l'horizon I (kgN.ha-1), qui dépend de l'indice de nitrification A; quand A = 1, nitrification maximale, l'équation est ajustée pour que la nitrification soit de 21 kgN-NH4.ha-1 lorsque sont présents 100 kgN-NH4.ha-1.
B2	N-NH4 maximum disponible pour la nitrification (kg.ha-1); on présume qu'il doit rester un minimum de 5 µg.g-1 de N dans l'horizon I
CNI(I)	capacité de nitrification ajustée aux conditions de N-NH4 du jour après la nitrification et aux variables XW et XT
ELNC	facteur de la capacité de nitrification, qui correspond au facteur minimum parmi les facteurs de concentration de N-NH4, de température et d'humidité.
FAC(I)	facteur de conversion de l'azote de kg.ha-1 a µg.g-1 pour chaque horizon
NH4(I)	concentration de N-NH4 dans l'horizon I (µg.g-1)
PH(I)	donnée d'entrée du pH pour l'horizon I
PHN(I)	facteur qui dépend du pH de l'horizon I; on l'évalue au début du programme et il est égal à 1 pour 6 <= pH <= 8
RNTRF	nitrification du jour dans l'horizon I (Kg N/Ha)
RP2	capacité de nitrification du jour; entre 0.05 et 1.0 quand ELNC = 0    exp(2.302 * ELNC) = 1 quand ELNC = 1    exp(2.302 * ELNC) = 10 et dépend de la capacité de nitrification ajustée du jour antérieur CNI(I)
SANC	facteur variant en fonction de la concentration de N-NH4 avant que ne se produise la nitrification du jour SANC = 0    pour    1    µg.g-1 de N-NH4 SANC = 0.13 pour    10    µg.g-1 de N-NH4 SANC = 0.75 pour    100 µg.g-1 de N-NH4
SARNC	facteur variant en fonction de la concentration de N-NH4 une fois que s'est produite la nitrification du jour utilisée pour ajuster CNI(I) SNH4(I) N-NH4 dans l'horizon I (kg.ha-1)
SNO3(I)	N-NO3 dans l'horizon I (kg.ha-1)
TF	facteur qui dépend de la température du sol dans l'horizon I le jour considéré
TFY(I)	facteur de la température du sol du jour antérieur pour l'horizon I

WFD facteur d'humidité du jour pour la nitrification (0-1) dans l'horizon I, égal à la fraction d'eau disponible présente dans l'horizon I par rapport à la disponibilité potentielle quand il n'y a pas saturation; quand il y a saturation il est égal à 1 - humidité à la saturation

WFY(I) facteur d'humidité pour la nitrification du jour antérieur dans l'horizon I

XW facteur d'humidité qui correspond au plus élevé des facteurs d'humidité du jour considéré et du jour antérieur

XT facteur de température qui correspond au plus élevé parmi les facteurs de température du jour considéré et du jour antérieur

### 1.3.7. Algorithmes de la dénitrification

#### 1.3.7.1. Selon CERES

Quotidiennement et par horizon, on calcule la dénitrification après la nitrification, lorsque sont remplies simultanément les conditions suivantes:

il y a plus de 1  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de N-NO<sub>3</sub> dans l'horizon  
 le contenu en eau est plus élevé que la capacité au champ dans l'horizon  
 la température du sol est supérieure à 5°C dans l'horizon

$$\text{SNO3(I)} = \text{SNO3(I)} - \text{DNRATE}$$

$$\text{DNRATE} = 0.00006 * \text{CW} * \text{NO3(I)} * \text{BD(I)} * \text{FW} * \text{FT} * \text{DLAYR(I)}$$

si  $\text{DNRATE} > (\text{SNO3(I)} - 0.25/\text{FAC(I)})$   $\text{DNRATE} = \text{SNO3(I)} - 0.25/\text{FAC(I)}$

$$\text{CW} = \text{FAC(I)} * (\text{SOILC} * 0.0031 + 0.4 * \text{FPOOL(I,1)}) + 24.5$$

$$\text{SOILC} = 0.58 * \text{HUM(I)}$$

$$\text{FW} = 1 - (\text{SAT(I)} - \text{SW(I)}) / (\text{SAT(I)} - \text{DUL(I)})$$

$$\text{FT} = 0.1 * \exp(0.046 * \text{ST(I)})$$

BD(I) donnée d'entrée de la densité apparente pour l'horizon I ( $\text{g/cm}^3$ )

CW facteur de disponibilité du C dans l'horizon I, qui assume 40 % du pool de hydrates de carbone de la matière organique fraîche et  $0.58 * 0.0031$  de la matière organique du sol plus 24.5  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (valeur minimale pour qu'il y ait dénitrification ?)

DLAYR(I) épaisseur de l'horizon I (cm)  
 DNRATE dénitrification du jour considéré (kgN.ha-1); on  
 présume qu'il doit rester un minimum de 0.25 µg.g-1  
 de N-NO3  
 DUL(I) donnée d'entrée de la capacité au champ de l'horizon  
 I (cm.cm-1)  
 FAC(I) facteur de conversion de kg.ha-1 a µg.g-1 pour  
 l'horizon I  
 FPOOL(I,1) hydrates de carbone dans l'horizon I (kg.ha-1)  
 FW facteur d'humidité pour la dénitrification  
 FT facteur de température pour la dénitrification  
 (valeurs comprises entre 0.1 et 0.046)  
 NO3(I) concentration de N-NO3 dans l'horizon I (µg.g-1)  
 SAT(I) donnée d'entrée du contenu en eau du sol à saturation  
 de l'horizon I (cm/cm)  
 SNO3(I) N-NO3 dans l'horizon I (kg.ha-1)  
 SOILC contenu en C de l'humus (kg.ha-1 à raison de 58% de  
 C)  
 ST(I) température du sol dans l'horizon I  
 SW(I) contenu en eau de l'horizon I le jour considéré  
 (cm.cm-1)  
 0.00006 constante de la vitesse de dénitrification (0.00006  
 d<sup>-1</sup>) par 0.1 pour la conversion de µg.g-1 a kg.ha-1 en  
 multipliant par BD(I) et DLAYR(I)  
 0.0031 coefficient non justifié  
 24.5 coefficient non justifié

### 1.3.8. Algorithmes de l'hydrolyse de l'urée

#### 1.3.8.1. Selon CERES

Dans le cas où le fertilisant ajouté est de l'urée, on calcule quotidiennement l'hydrolyse de l'urée par horizon:

$$\begin{aligned} \text{SNH4(I)} &= \text{SNH4(I)} + \text{UHYDR} \\ \text{UREA(I)} &= \text{UREA(I)} - \text{UHYDR} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{UHYDR} &= \text{AK} * \text{minimum}(\text{SWF}, \text{TF}) * \text{UREA(I)} \\ &\text{si UHYDR} > \text{UREA(I)} \quad \text{UHYDR} = \text{UREA(I)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{AK} &= -1.21 + 1.31 * \text{OC(I)} + 0.203 * \text{PH(I)} - 0.155 * \\ &\text{OC(I)} * \text{PH(I)} \\ &\text{si AK} < 0.25 \quad \text{AK} = 0.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SWF} &= \text{MF} + 0.20 \\ \text{TF} &= (\text{ST(I)}/40.0) + 0.20 \\ &\text{si TF} < 0 \quad \text{TF} = 0 \end{aligned}$$

AK hydrolyse potentielle en fonction du %C et du pH de l'horizon I considérés comme données d'entrée

MF fraction d'eau disponible

OC(I) donnée d'entrée de %C organique de l'horizon I

PH(I) donnée d'entrée du pH de l'horizon I

SNH4(I) N-NH4 dans l'horizon I (kg.ha-1)

ST(I) température du sol dans l'horizon I

SWF humidité minimale pour l'hydrolyse (+ 0.20)

TF facteur de température pour l'hydrolyse (différent de celui pour la minéralisation et pour la nitrification:  $TF = (ST(I) - 5) / 30$ )

UHYDR hydrolyse de N-urée le jour considéré (kg.ha-1)

UREA(I) N-urée dans l'horizon I (kg.ha-1)

### 1.3.9. Algorithmes du calcul de la demande d'azote par la plante

#### 1.3.9.1. Selon CERES

On calcule quotidiennement la demande de N total à partir de la demande de N par la partie aérienne et de la demande de N par la racine:

$$\begin{aligned}
 NDEM &= TNDEM + RNDEM \\
 TNDEM &= STOVWT * (TCNP - TANC) + DNG \\
 RNDEM &= RTWT * (RCNP - RANC) + PGRORT * RCNP
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 DNG &= PDWI * TCNP \\
 TCNP &= \exp(1.52 - 0.160 * XSTAGE) / 100 \\
 TANC &= STOVN / STOVWT \\
 RCNP &= 1.06 / 100 \\
 RANC &= ROOTN / RTWT
 \end{aligned}$$

DNG demande de N par la partie aérienne due à la croissance potentielle du jour considéré, TCNP est selon l'état de croissance du jour antérieur

NDEM demande de N total par plante (gN par plante)

PDWI croissance potentielle de la partie aérienne pour le jour considéré, qui dépend de l'augmentation de la matière sèche potentielle calculée pour le jour et de la fraction de matière sèche qui est assignée à la partie aérienne le jour considéré

PGRORT croissance potentielle des racines pour le jour considéré, qui dépend de l'augmentation de la matière sèche potentielle calculée pour le jour et de la fraction de matière sèche qui est assignée aux racines le jour considéré

RANC	concentration de N des racines, où la quantité de N s'obtient le jour antérieur et RTWT est celui du jour considéré (gN.g-1 de matière sèche)
RCNP	valeur constante de la concentration critique de N dans les racines (gN.g-1 de matière sèche)
RNDEM	demande de N par les racines (gN par plante)
ROOTN	contenu en N des racines calculé avec le Prélèvement d'azote du jour antérieur (gN par plante)
RTWT	poids des racines pour le jour considéré, calculé à partir du reste de la photosynthèse du jour qui n'est pas utilisé par la partie aérienne, après avoir considéré le facteur de stress de N dû au prélèvement d'azote du jour antérieur (g.plante)
STOVN	contenu en N de la partie aérienne calculé avec le Prélèvement d'azote du jour antérieur (gN. par plante)
STOVWT	poids de la partie aérienne pour le jour considéré, calculé à partir de la photosynthèse du jour, après avoir considéré le facteur de stress d' azote dû au prélèvement d'azote du jour antérieur (g/plante)
TANC	concentration de N de la partie aérienne, où la quantité de N s'obtient le jour antérieur et STOVWT est celui du jour considéré (gN.g-1 de matière sèche)
TCNP	concentration de N critique pour la partie aérienne calculé avec XTAGE du jour antérieur (gN.g-1 de matière sèche)
TNDEM	demande de N par la partie aérienne (gN. par plante)
XSTAGE	indicateur de l'état de croissance de la plante calculé quotidiennement; dans ce cas, il s'agit du XSTAGE calculé pour le jour antérieur

NOTE: TANC et RANC s'actualisent après avoir calculé le prélèvement d'azote du jour considéré, et cette valeur nouvelle de TANC s'utilise pour calculer les facteurs de stress du jour suivant.

### 1.3.10. Algorithmes du calcul du prélèvement d'azote par la plante

#### 1.3.10.1. Selon CERES

On calcule quotidiennement le Prélèvement d'azote total en fonction de la demande totale de N et de la disponibilité de NH4 et NO3 totale (dans tout le profil). Le modèle présume que la plante n'a pas de préférence entre le NH4 et le NO3:

```

10) DSTOVN = TNDEM / NDEM * TRNU - PTF * TRNLOS / (PLANTS *
DROOTN = RNDEM / NDEM * TRNU - (1 -
PTF)*TRNLOS/(PLANTS*10)

```

```

TRNU = TRNU + UNO3 + UNH4 par horizon

```

```

UNO3 = RNO3(I) * NUF
si UNO3 > (SNO3(I) - 0.25/FAC(I))
alors UNO3 = SNO3(I) - 0.25/FAC(I)

```

```

UNH4 = RNH4(I) * NUF
si UNH4 > (SNH4(I) - 0.5/FAC(I))
alors UNH4 = SNH4(I) - 0.5/FAC(I)

```

```

NUF = ANDEM / TRNU

```

```

où TRNU = TRNU + RNO3(I) + RNH4(I)

```

```

si ANDEM <= 0.0 alors NUF = 0.0

```

```

si ANDEM > TRNU alors ANDEM = TRNU et NUF =

```

```

1.0

```

```

ANDEM = NDEM * PLANTS * 10.0
RNO3(I) = RFAC * FNO3 * 0.006
RNH4(I) = RFAC * FNH4 * 0.006

```

```

RFAC = RLV(I) * SMDRF * SMDRF * DLAYR(I) * 100

```

```

SMDRF = (SW(I) - LL(I)) / (DUL(I) - LL(I))

```

```

si SMDRF < 0.0 alors SMDRF = 0

```

```

si SMDRF > 1.0 alors SMDRF = (SAT(I)-SW(I))/(SAT(I)-
DUL(I))

```

```

FNO3 = 1.0 - exp(-0.030 * NO3(I))
si FNO3 < 0.04 alors FNO3 = 0.0
si FNO3 > 1.0 alors FNO3 = 1.0

```

```

FNH4 = 1.0 - exp(-0.030 * (NH4(I) - 0.5))
si FNH4 < 0.04 alors FNH4 = 0.0
si FNH4 > 1.0 alors FNH4 = 1.0

```

```

ANDEM      demande de N total par les plantes (kg.N.ha-1)
DLAYR(I)   donnée d'entrée de l'épaisseur de l'horizon (cm)
DROOTN     augmentation de N durant la journée dans les racines
           de la plante (gN.par plante)
DSTOVN     augmentation de N durant la journée dans la partie
           aérienne de la plante (gN.par plante)
DUL(I)     donnée d'entrée de la capacité au champ de l'horizon
           I (cm3.cm3-1)
FAC(I)     facteur de conversion de l'azote de kg.ha-1 à µg.g-1
           pour chaque horizon

```

FNH4	facteur de disponibilité de N-NH4 dans l'horizon I pour l'extraction par les racines, limité entre 0.04 et 1.0; 0.5 $\mu\text{g.g}^{-1}$ est le minimum qui doit subsister.
FNO3	facteur de disponibilité de N-NO3 dans l'horizon I pour l'extraction par les racines, limité entre 0.04 et 1.0
LL(I)	donnée d'entrée du point de flétrissement de l'horizon I ( $\text{cm}^3.\text{cm}^3^{-1}$ )
NDEM	demande de N total par plante (gN.par plante)
NH4(I)	concentration de N-NH4 dans l'horizon I ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
NO3(I)	concentration de N-NO3 dans l'horizon I ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
NUF	fraction du Prélèvement d'azote, égale à la demande de N par les plantes ( $\text{kg.N.ha}^{-1}$ ) divisé par le Prélèvement d'azote total potentiel des racines ( $\text{kg.N.ha}^{-1}$ ); NUF = 0 si ANDEM $\leq$ 0, et NUF = 1 si ANDEM > TRNU
PLANTS	densité de plantation (plantes/m <sup>2</sup> )
PTF	fraction de matière sèche de la partie aérienne par rapport à la matière sèche totale de la plante
RFAC	facteur de capacité d'extraction des racines dans l'horizon I: dépend de la densité des racines et de l'humidité dans l'horizon I (100 paraît être un facteur de conversion pour que l'on obtienne le Prélèvement d'azote potentiel NO3 ou NH4 en $\text{kg.N.ha}^{-1}$ )
RLV(I)	densité de longueur des racines dans l'horizon I (cm racines/cm <sup>3</sup> sol)
RNDEM	demande de N par les racines (gN.par plante)
RNH4(I)	N-NH4 extractible par les racines dans l'horizon I
RNO3(I)	N-NO3 extractible par les racines dans l'horizon I
SAT(I)	donnée d'entrée du contenu en eau du sol à saturation de l'horizon I ( $\text{cm}^3.\text{cm}^3^{-1}$ )
SMDRF	fraction d'eau disponible par rapport à l'eau potentiellement disponible dans l'horizon I quand il n'y a pas saturation; quand il y a saturation, elle est égale à la fraction d'eau nécessaire pour la saturation par rapport à l'humidité à la saturation
SNH4(I)	N-NH4 dans l'horizon I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ )
SNO3(I)	N-NO3 dans l'horizon I ( $\text{kg.ha}^{-1}$ )
SW(I)	humidité de l'horizon I le jour considéré ( $\text{cm}^3.\text{cm}^3^{-1}$ )
TNDEM	demande de N de la partie aérienne (gN.par plante)
TRNLOS	N total perdu par les racines dans tout le profil ( $\text{gN.par plante}$ ), somme de RNLOSS calculé pour chaque horizon, voir paragraphe 1.3.3.1.
TRNU	Prélèvement d'azote total actuel ( $\text{kg.N.ha}^{-1}$ ) quand on calcule à partir de UNO3 et UNH4, et Prélèvement d'azote total potentiel des racines ( $\text{kg.N.ha}^{-1}$ ) quand on calcule à partir de RNO3(I) et RNH4(I)

UNH4 N-NH4 actuellement extrait par les racines dans l'horizon I (kg.N.ha-1), qui correspond à la fraction de RNH4(I) qui s'extraira selon la demande

UNO3 N-NO3 actuellement extrait par les racines dans l'horizon I (kg.N.ha-1), qui correspond à la fraction de RNO3(I) qui s'extraira selon la demande

0.006 (dans la première version, ce facteur était égal à 0.008

#### 1.4. Constantes et calculs divers

1.4.1. Changements dans les pools de NH4 et NO3 pendant les calculs d'une journée

##### 1.4.1.1. Selon CERES

Durant l'intervalle de calcul d'une journée, on actualise les pools de NH4 et NO3 aux occasions suivantes:

1) addition de fertilisant (excepté urée) dans la journée considérée:

$$\begin{aligned} \text{SNO3(I)} &= \text{SNO3(I)} + \text{AFERT(J)} * \text{PROF(K)} \\ \text{SNH4(I)} &= \text{SNH4(I)} + \text{AFERT(J)} * \text{PROF(K)} \end{aligned}$$

ou hydrolyse de l'urée:

$$\text{SNH4(I)} = \text{SNH4(I)} + \text{UHYDR}$$

2) minéralisation nette des résidus végétaux et de l'humus:

$$\begin{aligned} \text{SNH4(I)} &= \text{SNH4(I)} + \text{NNOM} \\ \text{NNOM} &= 0.8 * \text{GRNOM} + \text{RHMIN} - \text{RNAC} \end{aligned}$$

3) nitrification:

$$\begin{aligned} \text{SNH4(I)} &= \text{SNH4(I)} - \text{RNTRF} \\ \text{SNO3(I)} &= \text{SNO3(I)} + \text{RNTRF} \end{aligned}$$

4) dénitrification:

$$\text{SNO3(I)} = \text{SNO3(I)} - \text{DNRATE}$$

5) extraction des racines:

$$\begin{aligned} \text{SNO3(I)} &= \text{SNO3(I)} - \text{UNO3} \\ \text{SNH4(I)} &= \text{SNH4(I)} - \text{UNH4} \end{aligned}$$

La valeur du contenu des pools écrite par le programme est le résultat de la réalisation de toutes ces opérations avec un intervalle de calcul d'une journée.

AFERT(J)	quantité de fertilisant ajouté le jour J considéré (kg.N.ha-1)
DNRATE	dénitrification du jour considéré (kg.N.ha-1)
GRNOM	N brut total libéré par la décomposition des résidus dans l'horizon I
NNOM	N net libéré par la minéralisation des résidus et de l'humus
PROF(I)	fraction de la profondeur d'addition du fertilisant correspondant à l'horizon I
RHMIN	N minéralisé de l'humus dans l'horizon I (kg.N.ha-1)
RNAC	immobilisation brute de N par la biosynthèse des micro-organismes qui participent à la décomposition des résidus
RNTRF	nitrification du jour dans l'horizon I (kg.ha-1)
SNH4(I)	N-NH4 dans l'horizon I (kg.ha-1)
SNO3(I)	N-NO3 dans l'horizon I (kg.ha-1)
UHYDR	Hydrolyse de N-urée le jour considéré (kg.ha-1)
UNH4(I)	N-NH4 actuellement extrait par les racines dans l'horizon I (kg.N.ha-1)
UNO3(I)	N-NO3 actuellement extrait par les racines dans l'horizon I (kg.N.ha-1)

#### 1.4.2. Prise en compte de l'adsorption de l'ammonium

##### 1.4.2.1. Selon CERES

Le modèle considère (sans le justifier mais il s'agit probablement de ne pas bloquer les calculs) qu'il doit rester un minimum de NH4 et de NO3 dans les horizons respectifs:

pour le NH4, le minimum est de 0.5 µg.g-1  
pour le NO3, le minimum est de 0.25 µg.g-1

quand se produit la nitrification, la dénitrification ou le Prélèvement d'azote. Il fait allusion au fait que dans le cas de NH4, le minimum est plus élevé en raison de l'adsorption de l'azote NH4 par le sol.

### 1.4.3. Constantes utilisées dans les calculs en rapport avec l'Azote

#### 1.4.3.2. Selon CERES

- \* 40 % de la matière organique est C, pour tout composé organique et en tout moment sauf pour l'humus où C= 58%.
- \* La composition de résidus végétaux est par définition la suivante: 20 % de glucose, 70 % de cellulose, 10 % de lignine.
- \* Les micro-organismes ont une efficacité d'utilisation du substrat pendant la décomposition des résidus de 40 %.
- \* C/N = 8 pour les micro-organismes qui participent à la décomposition des résidus végétaux.
- \* C/N = 10 pour la matière organique du sol (humus).
- \* Les cinétiques de décomposition des résidus, de la minéralisation de l'humus, de la dénitrification et de l'hydrolyse de l'urée sont de premier ordre.
- \* Constantes des vitesses de transformation de l'azote:

POOL	PROCESSUS	CONSTANTE j <sup>-1</sup>
résidus	hydrates de carbone	0.2
	cellulose	0.05
	lignine	0.0095
humus	minéralisation	0.000083
NO3	dénitrification	0.0006

- \* 20 % de l'azote de la décomposition des résidus s'organise dans les composés humiques.
- \* On considère l'immobilisation de l'azote par activité des micro-organismes uniquement pendant la décomposition des résidus.
- \* Le niveau minimum de NH<sub>4</sub> et de NO<sub>3</sub> qui doit rester est respectivement de 0.5 µg.g<sup>-1</sup> et 0.25 µg.g<sup>-1</sup> par horizon.
- \* Dans le prélèvement de l'azote, la plante n'a pas de préférence entre le NH<sub>4</sub> et le NO<sub>3</sub>.

\* Dans n'importe quelle phase de croissance de la plante, 0.5 % des racines meurent, pourvu que la concentration actuelle d'azote dans la partie aérienne soit plus élevée que la concentration critique respective.

\* La concentration critique d'azote pour les racines du maïs est de 1,06%.

## 1.5. Exercices de sensibilité concernant l'azote

### 1.5.1. Expérience de terrain

L'expérience de terrain réalisée afin d'obtenir un jeu de données d'entrée pour les modèles CERES, EPIC et NCSWAP, a surtout servi à obtenir des données sur la partie aérienne de la plante, en raison de la facilité de leur obtention (Cf. Annexe I.4.). Mais au cours de cette expérience, ont été également acquises les données sur l'extraction de N par la partie aérienne de la plante dans des conditions optimales d'humidité et de N.

### 1.5.2. Données utilisées

En ce qui concerne les données d'entrée en rapport avec les processus de l'azote que requièrent chacun des modèles, nous avons des données obtenues expérimentalement (TABLEAU 15.3.) et des données présumées ou obtenues de la bibliographie (TABLEAU 15.4.).

TABLEAU 15.3. DONNEES DE L'AZOTE OBTENUES EXPERIMENTALEMENT

DONNEE D'ENTREE	MODELE	UNITE
C organique par horizon	CERES	%
pH par horizon		u pH
concentration initiale de NH <sub>4</sub> par horizon		mgN.kg-1 sol
concentration initiale de NO <sub>3</sub> par horizon		mgN.kg-1 sol
fertilisation minérale de N		
date		j/mm/a
quantité		kg.N.ha-1
profondeur		cm
code du fertilisant		# entier d'après référence du modèle

TABLEAU A 15.4. DONNEES PRESUMEEES OBTENUES DANS LA BIBLIOGRAPHIE RELATIVES AU N

DONNEE D'ENTREE	MODELE	VALEUR	UNITE	OBSERVATION
facteur d'ajustement de la rapidité de minéralisation de l'humus par protection chimique ou physique	CERES	1.0		d'après référence de l'utilisation du modèle (JONES et KINIRY 1986) pour un sol qui n'est pas Oxisol, Ultisol ou Dystrandept
poids des résidus de la surface		2000	kg.ha-1	
profondeur d'incorporation des résidus de la surface		30	cm	
C/N des résidus de la surface		75		le modèle l'assigne par défaut bien qu'il y ait possibilité de le faire varier
poids des racines de la culture antérieure		200	kg.ha-1	le modèle l'assigne par défaut bien qu'il y ait possibilité de le faire varier

### 1.5.3. Analyses de sensibilité pour le modèle CERES

On réalise des simulations en variant les valeurs des données d'entrée en rapport avec l'azote afin de mettre en évidence l'effet qu'elles ont sur les résultats simulés de:

biomasse produite  
 grains produits  
 prélèvement d'azote par la plante  
 évolution de l'azote NH<sub>4</sub> dans le sol  
 évolution de l'azote NO<sub>3</sub> dans le sol

afin d'établir ainsi le degré de précision que requièrent ces données dans nos conditions édapho-climatiques et de gestion. On réalise les simulations pour la variété PB8, avec une dose de N 108 kg.ha-1, excepté dans les cas où il est indiqué que le traitement est effectué avec une dose de 270 kg.N.ha-1.

TABLEAU A.15.5.

DONNEES A FAIRE VARIER ET MARGE DE VARIATION  
POUR L'ANALYSE DE SENSIBILITE

MODELE	DONNEE	VALEUR BASE	ORDRE DE VARIATION	AUGMENTATION DE LA VARIATION
CERES	poids des résidus de surface (kg.ha-1)	2000	1000 - 5000	1000
CERES	C/N résidus de surface	75	40 - 90	40, 60, 75, 90
CERES	profondeur d'incorporation des résidus superficiels (cm)	30	5 - 30	5, 10, 20, 30
CERES	poids des racines de la culture antérieure (kg.ha-1)	200	200 - 2000	200, 500, 1000, 2000
CERES	C organique par horizon (%)	0.7 0.6 0.5 0.3 0.2	0.6 - 0.9 0.5 - 0.8 0.4 - 0.7 0.2 - 0.5 0.1 - 0.3	0.1
	on augmente simultanément tous les horizons de 0.1 %			
CERES	facteur d'ajustement de la vitesse de minéralisation de l'humus	1.0	0.2 - 1.0	0.2
	on assume les valeurs données dans la référence du modèle pour différents sols			
CERES	pH par horizon	5.6 5.5 5.9 6.3 6.4	3.6 - 6.6 3.5 - 6.5 3.9 - 6.9 4.3 - 7.3 4.4 - 7.4	1.0
	on augmente simultanément tous les horizons de 1.0			
CERES	NO3 initial dans les horizons 1 et 2 (mgN.kg-1 sol)	10.0 10.0	2.0 - 14.0 2.0 - 14.0	4.0 4.0
	ordre de variation saisonnière sans fertilisation-N			
CERES	NH4 initial dans les horizons 1 et 2 (mgN.kg-1 sol)	3.0 3.0	2.0 - 14.0 2.0 - 14.0	4.0 4.0
	ordre de variation saisonnière sans fertilisation-N			

### 1.5.3. Effet de la précision des données d'entrée sur les résultats simulés

#### 1.5.3.1. CERES: Poids des résidus de surface (STRAW)

Dans les conditions de notre expérience, une variation de 400 % dans le poids des résidus de surface de la culture antérieure (de 1000 à 5000 kg.ha<sup>-1</sup>) ne produit pas de variation appréciable dans les résultats de simulation de (TABLEAU A 15.6) : la biomasse produite, la production de grains, le prélèvement d'azote, l'évolution de l'azote minéral qui en résulte après avoir calculé tous les processus de changements de l'azote du sol, y compris l'extraction par les racines. La variation est une augmentation de l'ordre de 2 à 4 %.

Dans le cas d'une expérience avec fertilisation, il se produit en réalité une diminution de la production en raison de la concurrence des micro-organismes pour le N pendant la décomposition des résidus. En fait tout dépend du temps qui s'écoule entre l'enfouissement des résidus et le semis. Cette simulation est donc à corriger au moins de ce point de vue.

TABLEAU A15.6. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR LE POIDS DES RESIDUS DE SURFACE (STRAW)  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

STRAW	GRAINS	BIOMASSE	Prel.Azote	APPORT DE N*
kg.ha-1	kg.ha-1	kg.ha-1	kg.N.ha-1	kg.N.ha-1
1000	4672	9145	95.1	4.8
2000	4707 (+35)	9251 (+106)	96.4 (+1.3)	9.6
3000	4725 (+18)	9304 (+ 53)	97.0 (+0.6)	14.4
4000	4747 (+22)	9374 (+ 70)	98.1 (+1.1)	19.2
5000	4765 (+18)	9430 (+ 56)	98.9 (+0.8)	24.0

\* on présume que 40 % de C et 90 % de N est labile, C/N = 75

La quantité de 1000 kg.ha<sup>-1</sup> de résidus représente environ 4.8 kg.N.ha<sup>-1</sup> et 5000 kg.ha<sup>-1</sup> représentent 24 kg.N.ha<sup>-1</sup> (C/N=75, 40 % de C, 90 % de N labile). D'après le modèle, 80 % passe à la forme minérale, moins ce qui s'immobilise durant la décomposition.

Nous observons que selon la simulation, il y a une augmentation de la minéralisation nette des résidus lorsque STRAW varie de 1000 à 5000 kg.ha<sup>-1</sup>, laquelle se reflète dans l'augmentation de Prélèvement d'azote . Par contre, la

variation des pools de N min ne reflète pas le sens de la transformation de l'azote des résidus.

### 1.5.3.2. CERES C/N des résidus de surface (SCN)

Si le C/N des résidus varie de 40 à 90, il se produit une diminution dans le Prélèvement d'azote (TABLEAU A.15.7). Ce fait semble être en relation directe avec la diminution de l'apport de N dans les résidus, et indirecte avec l'augmentation de l'immobilisation de l'azote.

TABLEAU A 15. 7. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR LE C/N DES RESIDUS DE SURFACE (SCN)  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

SCN	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prel.d'Azote kg.N.ha-1	APPORT POTENTIEL DE N* kg.N.ha-1
40	4795	9525	100.2	18.0
60	4728 (-67)	9315 (-210)	97.2 (-3.0)	12.0
75	4707 (-21)	9251 (- 64)	96.4 (-0.8)	9.6
90	4682 (-25)	9173 (- 78)	95.3 (-1.1)	8.0

\* on présume que 40 % de C et 90 % de N est labile, STRAW = 2000 kg.ha-1

Nous voyons que le C/N des résidus a un effet plus grand sur la disponibilité des résidus pour l'azote que la quantité de résidus apportés. Dans le cas de STRAW, nous passons d'un apport potentiel de N de 4.8 à 24.0 (variation de 19.2) et le prélèvement d'azote passe de 95.1 à 98.9 (variation de 3.8). Dans le cas de SCN, nous passons d'un apport de 8.0 à 18.0 (variation de 10.0) et le prélèvement d'azote passe de 95.3 à 100.2 (variation de 4.9).

### 1.5.3.3. CERES Profondeur d'incorporation des résidus de surface (SDEP)

Lorsque varie la profondeur d'incorporation des résidus de surface de 5 à 30 cm, il ne se produit aucun changement dans les résultats de simulation analysés ici (TABLEAU A 15.8.):

TABLEAU A.15.8. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE POUR LA PROFONDEUR D'INCORPORATION DES RESIDUS DE SURFACE (SDEP)

SDEP cm	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1	APPORT POTENTIEL* kg.N.ha-1
5	4716	9278	96.4	9.6
10	4716	9278	96.4	9.6
20	4716	9278	96.4	9.6
30	4707	9251	96.4	9.6

\* on présume que 40 % de C et 90 % de N est labile, STRAW = 2000 kg.ha-1, C/N = 75

#### 1.5.3.4. CERES: Racines de la culture antérieure (ROOT)

Lorsque varie le poids des racines de 200 kg.ha<sup>-1</sup> à 2000 kg.ha<sup>-1</sup> (par défaut, le programme établit 200 kg.ha<sup>-1</sup> et permet ensuite des variations), les résultats de la simulation sont similaires à ce qui se passe quand il y a une variation des résidus de surface: un accroissement de 900 % produit une augmentation dans le Prélèvement d'azote de seulement 4 % (TABLEAU A 15.9.):

TABLEAU A 15.9. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DU POIDS DES RACINES DE LA CULTURE ANTERIEURE (ROOT) RESULTATS DE LA SIMULATION (BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

ROOT kg.ha-1	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1	APPORT POTENTIEL DE N <sup>*</sup> kg.N.ha-1
200	4707	9250	96.4	1.8
500	4720 (+13)	9290 (+ 40)	96.7 (+0.3)	4.5
1000	4738 (+18)	9344 (+ 54)	97.7 (+1.0)	9.0
2000	4791 (+53)	9513 (+169)	100.2 (+2.5)	18.0

\* on présume que 40 % de C et 90 % de N est labile, C/N=40 assigné dans le programme

#### 1.5.3.5. CERES: % C organique par horizon (OC)

Le % de C organique s'utilise pour calculer le pool initial de l'azote contenu dans la matière organique du sol, en supposant que 40 % de la matière organique est C et que C/N du sol est égal à 10 (paragraphe 1.3.2.1.).

Dans le cas du sol de Barinas, le contenu en C organique est faible, et l'analyse de sensibilité s'oriente sur l'effet que pourrait produire un manque de précision dans la détermination en laboratoire du % de C organique de  $\pm 0.1$  %, par horizon (TABLEAU 10):

TABLEAU A 15.10 CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DU % DE C ORGANIQUE PAR HORIZON (OC) RESULTAT (BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

% C organique					GRAINS	BIOMASSE	Prélèvement d'azote	N disponible
1	2	3	4	5	kg.ha-1	kg.ha-1	kg.N.ha-1	kg.N.ha-1 *
0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	4673	9139	93.6	5254
0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	4693 (+20)	9290 (+69)	95.6 (+2.0)	6825
0.8	0.7	0.6	0.4	0.3	4721 (+28)	9298 (+90)	98.7 (+3.1)	8397
0.9	0.8	0.7	0.5	0.4	4737 (+16)	9353 (+55)	100.8 (+2.1)	9968

\* on suppose un facteur d'ajustement pour la minéralisation DMOD=1 et C/N=10; on utilise pour le calcul la somme des valeurs par horizon de l'équation  $OC(I) \cdot DLAYR(I) \cdot BD(I) \cdot 100 \cdot DMOD$ , paragraphe 1.3.2.1.

Si nous comparons les ordres de variation des données d'entrée de STRAW, ROOT et OC, et leur effets sur le résultat simulé du prélèvement d'azote, nous pouvons observer que le C organique est une donnée qui requiert une beaucoup plus grande précision, parce que dans les calculs de l'azote de l'humus, un accroissement de C de 0.1 % dans chaque horizon implique un accroissement de 1571 kg.N.ha-1 dans tout le profil, pour le cas qui nous concerne.

L'évolution de N min total dans les horizons 1 et 3 (où se trouvent approximativement 70 % de l'azote de l'humus du profil), ne montre pas de différence évidente si le Carbone des horizons varie de +0.1% ou -0.1%.

1.5.3.6. CERES: Facteur d'ajustement de la minéralisation de l'humus (DMOD)

Le modèle suppose une constante de vitesse de minéralisation de l'humus de 0.000083 j<sup>-1</sup>, qu'on ajuste selon le type de sol en:

- 0.2 pour Dystrandeps
- 0.6 pour Oxisols et Ultisols
- 1.0 autres

selon l'effet de protection physique ou chimique de l'humus potentiellement minéralisable. Nous pouvons observer qu'un changement dans la valeur de DMOD de ±0.2 (qui équivaut à un changement dans la constante de vitesse de minéralisation de ±0.000016) produit un effet sur le Prélèvement d'azote d'environ 3% (TABLEAU A 15.11).

TABLEAU A 15.11.CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DU FACTEUR D'AJUSTEMENT DE LA CONSTANTE DE VITESSE DE Minéralisation DE L'HUMUS (DMOD) (BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

DMOD kg.ha-1	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1	CONSTANTE DE VITESSE j <sup>-1</sup> *
0.2	4590	8861	81.4	0.000017
0.4	4600 (+10)	8910 (+ 49)	83.5 (+2.1)	0.000033
0.6	4635 (+35)	9020 (+110)	86.6 (+3.1)	0.000050
0.8	4667 (+32)	9121 (+101)	91.4 (+4.8)	0.000066
0.9	4679 (+12)	9162 (+ 41)	93.7 (+2.3)	0.000075
1.0	4693 (+14)	9208 (+ 46)	95.6 (+1.9)	0.000083

\* calculé comme 0.000083\*DMOD

En considérant que la valeur de la constante de minéralisation de l'humus est une valeur présumée, qui varie significativement entre les modèles:

MODELE	Cte. de vitesse j <sup>-1</sup>	
JENKINSON ET PARRY (1988)	0.009	
CENTURY (1987)	0.02	active
	0.00054	lente
	0.000019	passive
NCSWAP (1985)	0.16	labile
	0.006	résistante
PAPRAN (1981)	0.000083	

Nous pouvons observer que dans la conception de CERES, la valeur de cette constante est d'importance pour le résultat du prélèvement d'azote. Lorsque la valeur de la constante de minéralisation varie entre 0.000017 et 0.000083 (au travers de DMOD), il se produit un accroissement du Prélèvement d'azote de 17 % (TABLEAU A.15.11.).

#### 1.5.3.7. CERES: pH par horizon

On observe que pour des pH peu élevés, de l'ordre de 4.6, la nitrification diminue. La mobilité de l'azote diminue donc, ce qui provoque un rendement plus élevé de la production, contrairement à ce que l'on attend dans la réalité (TABLEAU 12,).

TABLEAU A.15.12. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DU pH  
(BARINAS, PB8, DOSE N 108 FRACTIONNEE, IRRIGATION, DEC 89)

pH par horizon					GRAINS	BIOMASSE	Prélèvement d'azote	
1	2	3	4	5	kg.ha-1	kg.ha-1	kg.N.ha-1	
Résultats du champ					5200	9900	126	
4.6	4.5	4.9	5.3	5.4	4885 (-299)	9838 (-1007)	107	(-16.7)
5.6	5.5	5.9	6.3	6.4	4707 (-178)	9251 (- 587)	96	(-10.7)
6.6	6.5	6.9	7.3	7.4	4724 (+ 17)	9311 (- 60)	96	(- 0.1)

D'après le résultat de la simulation présenté dans la Tab.15.12, à pH 4.6 les nitrates n'augmentent pas, mais il y a une mobilité des nitrates des horizons 1 et 2 vers l'horizon 3 avant que ne commence la phase végétative de la plante. Postérieurement, ils maintiennent la valeur minimum établie par le programme (0.25 µg.g<sup>-1</sup>). A pH 5.6, le niveau des nitrates est plus élevé, et l'on observe clairement la mobilité des nitrates des horizons 1 et 2 vers l'horizon 3, même pendant la phase végétative de la plante.

Devant ce fait, on peut se demander si le stress de N qu présente le modèle CERES lors de la simulation de cette culture, n'est pas dû à une évaluation excessive de la mobilité des nitrates dans ces conditions édaphiques, car la production de grains obtenue par la simulation à pH 4,6 est assez proche de celle obtenue sur le terrain (5200 kg.ha<sup>-1</sup>), tenant compte du fait que la culture a été menée dans des conditions optimales de nutrition azotée.

Ces résultats de simulation suggèrent que le pH est un donnée qui requiert une assez grande précision de mesures dans les sols tropicaux qui sont souvent assez acides. Par ailleurs cet effet inattendu de l'acidité sur la nitrification mériterait d'être repensé car dans le cas des sols ferrugineux ou ferralitiques on observe de grandes variations de pH entre la saison sèche et la saison des pluies.

#### 1.5.3.8.CERES : NH<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> initial dans les horizons 1 et 2 sans fertilisation

Les mesures de N-NO<sub>3</sub> ou de N-NH<sub>4</sub> peuvent varier entre 2 et 14 µg.g<sup>-1</sup> pour ce sol, leur somme pouvant atteindre un maximum d'environ 24 µg.g<sup>-1</sup>. Etant donné que le modèle ne marque pas de préférence entre N-NH<sub>4</sub> et N-NO<sub>3</sub> pour le prélèvement d'azote, et ainsi que le démontrent certaines simulations qui ont été faites sans fertilisation, pour une même quantité totale de N min initial (N-NH<sub>4</sub> + N-NO<sub>3</sub> = 24 µg.g<sup>-1</sup>), la différence d'effet ne se trouve pas dans la proportion initiale entre N-NH<sub>4</sub> et N-NO<sub>3</sub>, mais bien dans la quantité totale de N min initial en absence de fertilisant-N (TABLEAU A.15.13.).

TABLEAU A.15.13 : CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DE N-NH<sub>4</sub> + N-NO<sub>3</sub> INITIAL (NH<sub>4</sub> + NO<sub>3</sub>)  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, PB8, SANS FERTILISANT, IRRIGATION, DEC 89)

NH <sub>4</sub> <sup>*</sup> µg.g <sup>-1</sup> de sol	NO <sub>3</sub> <sup>*</sup>	N MIN TOT µg.g <sup>-1</sup> ou kg.ha <sup>-1</sup> de sol		GRAINS kg.ha <sup>-1</sup>	BIOMASSE kg.ha <sup>-1</sup>	Prélèvement kg.N.ha <sup>-1</sup>
2	3	5	20	614	1617	8.1
6	3	9	36	1267	2929	14.2
10	2	12	48	1673	3519	17.3
10	3	13	52	1806	3452	18.6
10	6	16	64	2401	4537	23.2
14	3	17	68	2519	4748	24.4
10	10	20	80	2868	5448	29.3
10	14	24	96	3170	6196	35.0
4	20	24	96	3165	6239	35.3

\* valeurs pour les horizons 1 et 2, les autres horizons ne varient pas

Pour cet ordre de variation de N min initial (sans fertilisant et dans les horizons 1 et 2), on observe que le Prélèvement d'azote est proportionnel à la valeur de N min, le coefficient de proportionnalité étant d'environ 0,36 kg.N.ha-1 de Prélèvement d'azote pour 1 kg.N.ha-1 de N min initial présent dans les horizons 1 et 2 (20 à 96 kg pour 4000 t de terre sèche) Dans ces conditions sans fertilisation, le stress de N est maximum et la différence dans les résultats dépend essentiellement de M min initial: la simulation consiste à prélever cette quantité de N disponible dans la phase initiale de la croissance de la plante.

#### 1.5.3.9.CERES: NH4 et NO3 initial dans les horizons 1 et 2 avec fertilisation

Dans ce cas, on fait varier le N-NH4 des horizons 1 et 2, de façon à ce que varie le N min pour les deux horizons de 6, 12 et 18 µg.g-1. De plus on ajoute 150 kg.N.ha-1 d'urée le premier jour de la simulation, le jour du semis, pour voir quel est l'effet de la donnée de N min initial sur la simulation avec l'utilisation de fertilisant et dans nos conditions édapho-climatiques (TABLEAU 15 A 14).

TABLEAU A.15.14 CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DE N-NH4 + N-NO3 INITIAL  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, PB8, AVEC FERTILISATION 150 KG N/HA,  
IRRIGATION, DEC 89)

NH4*	NO3*	N MIN TOT		GRAINS	BIOMASSE	Prélèvement
µg.g-1		µg.g-1	et kg.ha-1	kg.ha-1	kg.ha-1	kg.N.ha-1
3	3	6	174	4898	9484	67.6
9	3	12	198	5007 (+111)	9935 (+451)	75.0 (+7.4)
15	3	18	224	5086 (+ 79)	10293 (+358)	82.1 (+7.1)

\* valeurs pour les horizons 1 et 2, les autres horizons ne varient pas

Malgré la présence de fertilisant (150 kg.N.ha-1 dans l'horizon 1, qui équivalent à 38 µg.g-1), pour ce modèle la donnée de N initial exerce une influence assez forte sur les résultats de simulation de Prélèvement d'azote. Il convient de faire observer que la simulation indique qu'il y a, pour tous les cas, stress de N. En présence de fertilisant il est encore plus évident que ce stress simulé est un artefact qu'il faut absolument éliminer avant de continuer à travailler avec le modèle CERES. Et à nouveau, il y a un Prélèvement d'azote d'environ 0.36 kg.N.ha-1 pour 1 kg.N.ha-1 de N minéral initial total disponible dans les horizons 1 et 2 (N min + N fertilisant).

La différence se produit pendant la phase végétative de la plante. Ensuite le niveau de N min se maintient proche du minimum dans les horizons 1 et 2, où se trouvent plus de 60 % des racines. En conséquence de quoi se maintient le rapport de 0.36 kg.N.ha<sup>-1</sup> de Prélèvement d'azote pour 1 kg.N.ha<sup>-1</sup> de N min disponible. Il faut ajouter à cela la lixiviation de l'azote NO<sub>3</sub>, lequel, à partir de la phase végétative, se trouve concentré dans l'horizon 4, où selon le modèle la densité des racines est très faible, et l'horizon 5, où elle est nulle. L'artefact de stress d'azote simulé par le modèle est sans doute lié à une simulation exagérée du lessivage des nitrates. Dans la réalité ceux ci ne sont pas lessivés sans doute par ce qu'ils n'ont pas le temps de se former, l'absorption racinaire prélevant l'ammonium avant que la nitrification intervienne.

1.5.3.10. CERES: quantité d'urée ajoutée (en une fois) le jour du semis (AFERT)

On fait varier la quantité d'urée ajoutée de ±20 kgN.ha<sup>-1</sup> (ce qui équivaut à ±5 µg.g<sup>-1</sup> pour 4000 Tm de terre), en partant du fait que dans l'expérience de terrain la quantité de 150 kg.N.ha<sup>-1</sup> est considérée comme optimale. On observe à nouveau, dans les résultats de la simulation, que l'effet se marque essentiellement sur le Prélèvement d'azote (TABLEAU 15) et qu'il y a un stress de N du même ordre dans tous les cas. Il s'agit d'une répétition de la situation que l'on a observée dans le cas de N min initial avec et sans fertilisant azoté.

TABLEAU A.15.15. CERES ANALYSE DE SENSIBILITE DE LA QUANTITE D'UREE (AFERT)  
RESULTATS DE LA SIMULATION  
(BARINAS, PB8, AVEC FERTILISATION, IRRIGATION, DEC 89)

UREE kg N/Ha	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1
130	4936	9636	70.1
150	5022 (+86)	9995 (+359)	76.2 (+6.1)
170	5088 (+66)	10300 (+305)	82.2 (+6.0)

Une augmentation de 350 kg.ha.<sup>-1</sup> (variation observée) dans la production de la biomasse aérienne, grains inclus, implique une augmentation dans l'extraction de N de l'ordre de 5 kg.ha<sup>-1</sup> (URBINA 1989). Si cette augmentation provenait totalement de l'azote du sol (5000 kg N.ha<sup>-1</sup> à 1 m de profondeur à Barinas), elle représenterait 0,1 % de ce N du sol. Mais 30% au moins de cet azote provenant du fertilisant, conformément à ce qui a été mesuré à Barinas (HETIER et al 1989), l'utilisation de l'azote dérivé du fertilisant augmenterait de 2 kg.ha<sup>-1</sup> soit environ 1%.

Ce résultat est normal car la simulation correspond au plateau de la courbe d'augmentation de production en fonction des apports d'azote. Son intérêt vient surtout du fait que si l'on observe encore une augmentation notable de la production et des concentrations d'azote optimales dans la plante le modèle ne devrait pas faire état de stress d'azote durant la croissance.

### 1.5.3.11 CERES AJOUT DE L'UREE PAR FRACTIONS

Dans la conception de l'expérience, on a considéré et démontré que l'ajout du fertilisant de façon fractionnée (9 applications) optimise l'extraction de N par la plante et favorise substantiellement la production de grains (URBINA 1989). On a fait l'essai de simulations avec le modèle pour comparer quelles sont ses réponses respectives face au fractionnement des apports de l'urée dans nos conditions édapho-climatiques (TABLEAU A.15.16).

TABLEAU A.15.16. CERES RESULTATS DE LA SIMULATION DE L'AJOUT DU FERTILISANT PAR FRACTIONS OU COMPLET (BARINAS, PB8, AVEC FERTILISATION, IRRIGATION, DEC 89)

UREE kg N/Ha	N° APPLICA- TIONS	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1
108	1 *	4613	9065	62.7
108	9	4707 (+ 94)	9251 (+186)	96.4 (+33.7)
270	1 *	5247	11024	102.9
270	9	4943 (-304)	10050 (-974)	114.8 (+11.9)

\* appliqué le jour du semis (jour 1 de la simulation)

Pour une dose d'urée de 108 kg.N.ha-1, il n'y a pas de différence dans la production de grains selon que l'ajout soit fractionné ou non, mais la différence est appréciable sur le Prélèvement d'azote. Dans les deux cas, le modèle rapporte encore un stress de N. Le fait qu'il n'y ait pas de différence dans la production de grains alors qu'il y en a une dans le Prélèvement d'azote, donne à penser que le pseudo- stress de N joue surtout sur les calculs de la production de grains: dans le cas de l'ajout en une fois, il y a plus de stress à la fin du cycle et dans le cas de l'ajout par fractions, il y a plus de stress dans la première étape du cycle, autre constatation qui nous montre la nécessité de modifier les conditions de déclenchement de la simulation du stress azoté.

### 1.5.3.12. CERES: sulfate d'ammonium ou urée (IFTYPE)

Les petites différences dans les résultats de simulation sont dues au fait que le N-NH<sub>4</sub> du sulfate d'ammonium passe rapidement à N-NO<sub>3</sub>, lequel, d'après la simulation, est lixivié, tandis que l'urée produit plus lentement le N-NH<sub>4</sub> hydrolyse. Par conséquent, celui-ci est lixivié plus lentement et il y a plus de N disponible pour la plante dans la première phase du cycle (TABLEAU 18). Nous ne savons pas expérimentalement ce qui se produit sur le terrain. Le seul point que l'on puisse faire observer, c'est que selon la simulation, l'hydrolyse de l'urée est complète après 7 jours et que dans le laboratoire, pour le même sol et à la même concentration, humidité et température, l'hydrolyse totale est produite après 2 ou 3 jours (Pour un sol similaire et pour des concentrations plus élevées, CARRILLO (1980) obtient un temps d'hydrolyse en laboratoire de 30 à 34 heures).

TABLEAU A.15.17. CERES RESULTATS DE SIMULATION SULFATE D'AMMONIUM VS UREE  
150 KG N/HA AJOUTES LE JOUR DU SEMIS  
(BARINAS, PB8, AVEC FERTILISATION, IRRIGATION, DEC 89)

TYPE DE FERTILISANT	GRAINS kg.ha-1	BIOMASSE kg.ha-1	Prélèvement d'azote kg.N.ha-1
SULFATE D'AMMONIUM	4949	9696	71.4
UREE	5022	9995	76.2

## CONCLUSIONS

### Précision des données d'entrée

Dans les conditions édapho-climatiques utilisées dans ce travail de simulation, la précision expérimentale habituelle dans l'obtention des données d'entrée liées à l'azote, ne produit pas, individuellement, de conséquences significatives sur les résultats de simulation de production de grains et de matière sèche. La seule qui réellement mériterait plus de précision pour améliorer notablement les simulations est la mesure de carbone total du sol qui par l'intermédiaire du C/N détermine les réserves azotées de l'humus.

### Algorithmes de simulation des différents phénomènes

En revanche, les simulations de prélèvement d'azote, suggèrent que les algorithmes mettant en relation le Prélèvement d'azote et la production de grains et de matière sèche devraient sans doute être améliorés. Ce problème général qui n'était pas à notre portée dans le cadre du présent travail, touche à l'utilisation de la concentration critique d'azote dans la plante. Cette notion est difficile à manier car dans la réalité les concentrations varient peu vu que la plante module sa croissance en fonction de la translocation interne et de l'azote qu'elle peut prélever dans la rhizosphère. Ce n'est donc pas une mesure qui se prête au calibrage. Son utilisation induit le stress en liaison avec la lixiviation de l'azote minéral ou la dénitrification. Or nous avons vu que les résultats font état de stress qui n'existent certainement pas en réalité.

La gestion de l'azote du sol proposée par le modèle correspond mal à la réalité expérimentale qui nous a montré (cf Annexe sur la Solution du sol) que l'extraction réelle peut faire appel à la minéralisation de l'azote organique du sol alors qu'il reste de l'azote nitrique dérivé du fertilisant. La culture de plante test en serre nous a montré que la plante pouvait prélever de l'azote sol en présence d'une grande quantité de nitrates dérivés du fertilisant. Or dans les conditions de simulation que nous avons étudié, le Prélèvement d'azote est toujours une fraction de l'azote minéral disponible ( $N_{\min} + N_{\text{fertilisant}}$ ) dans toutes les couches de sol atteintes par les racines. Ceci peut se produire encore plus facilement sur le terrain à cause de la localisation de l'engrais qui ne pénètre pas dans le sol autant que le suppose le modèle.

CERES est également peu sensible aux différentes doses de d'azote ou au fractionnement des apports (il présente du stress de N pour les deux traitements). Il faut dire que la dose faible que nous avons employé est déjà suffisante pour l'expression du potentiel génétique de la variété PB8.

### Stress

La simulation du stress doit être complètement reprise car elle perturbe gravement la simulation et donne lieu à des résultats aberrants dans le cas de CERES.

EPIC ne présente pas de stress par N durant la simulation, tandis que NCSWAP présente le même stress de N pour les deux doses, alors qu'on suppose que la dose de 270 kg.N.ha-1 dépasse largement les besoins la plante.

Tout cela résulte des calculs de la lixiviation des nitrates qui est très surestimée pour les conditions de Barinas. Cela s'observe surtout quand on simule pour un pH de 4.6, condition dans laquelle la nitrification est très basse, et cas où les résultats de simulation se rapprochent le plus des résultats de terrain. Sans doute pour cette même raison, le Prélèvement d'azote simulé s'avère être, dans tous les cas, toujours moindre que le N disponible initialement (N min + N fertilisant). L'effort d'adaptation aux conditions tropicales doit donc commencer par remettre à sa place la lixiviation qui ne joue certainement pas le même rôle que sous climat tempéré.

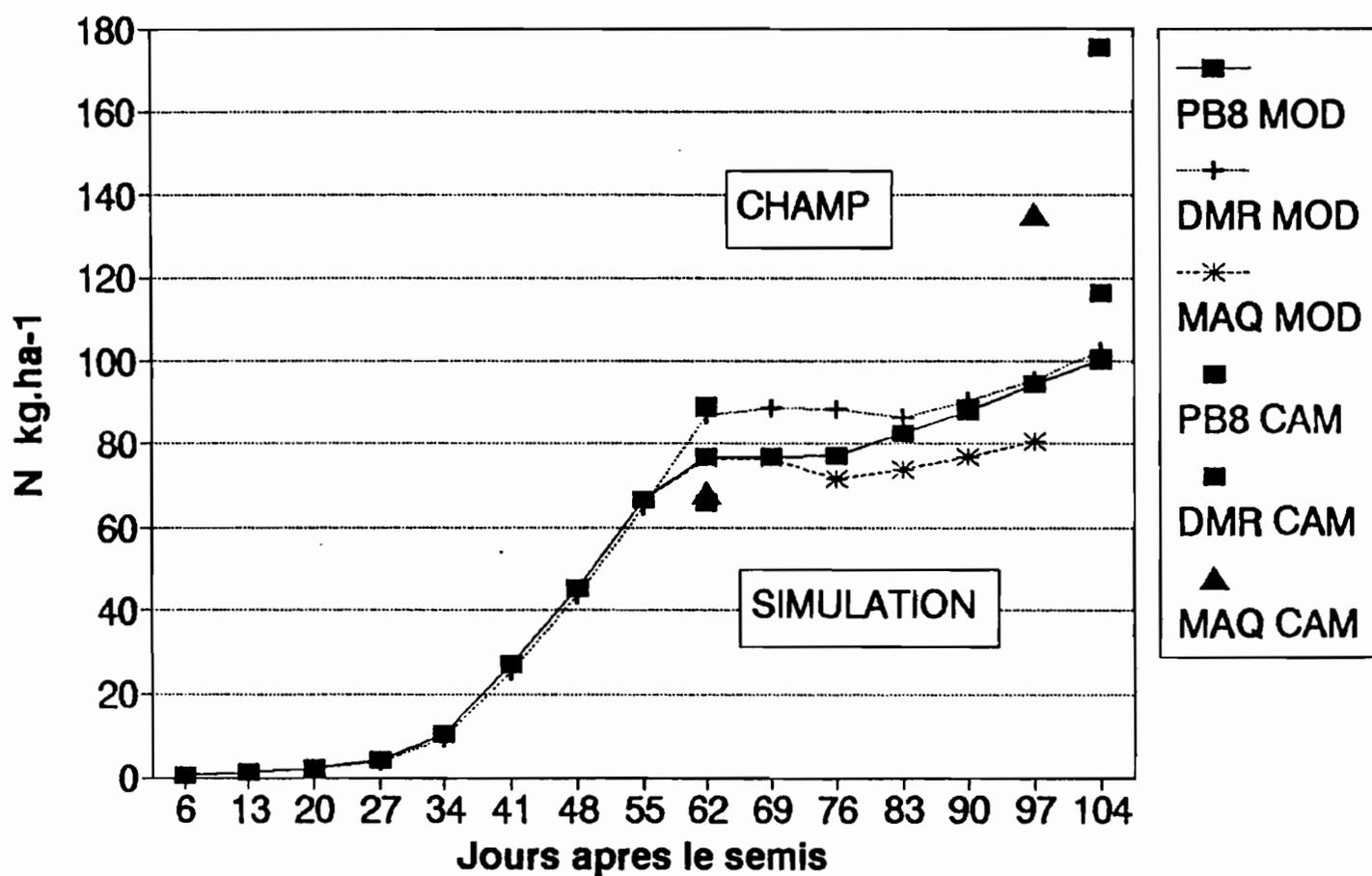
Pour terminer ces conclusions nous soulignerons le grand déséquilibre que l'on doit relever dans les systèmes de simulation. Nous venons de parler de la lixiviation mais il faut mentionner aussi la simulation de la dénitrification qui est pratiquement incontrôlable expérimentalement alors que son importance pourrait plus sûrement être évaluée à travers les déficits de bilans.

Ces déséquilibres sont tels tant pour CERES que pour NCSWAP, qu'il semble préférable de reprendre le système dans son ensemble en se limitant à simuler seulement les mécanismes pour lesquels on peut s'appuyer sur des mesures relativement faciles à faire pour étayer la calibration et la validation.

L'amélioration par retouches des systèmes proposés actuellement pour l'azote risque d'être une solution coûteuse en recherches longues et inutiles. Il semble préférable de repartir sur une nouvelle base reposant sur des données faciles à obtenir, précises et reproductibles dans des conditions proches de la réalité des cultures que l'on prétend simuler.

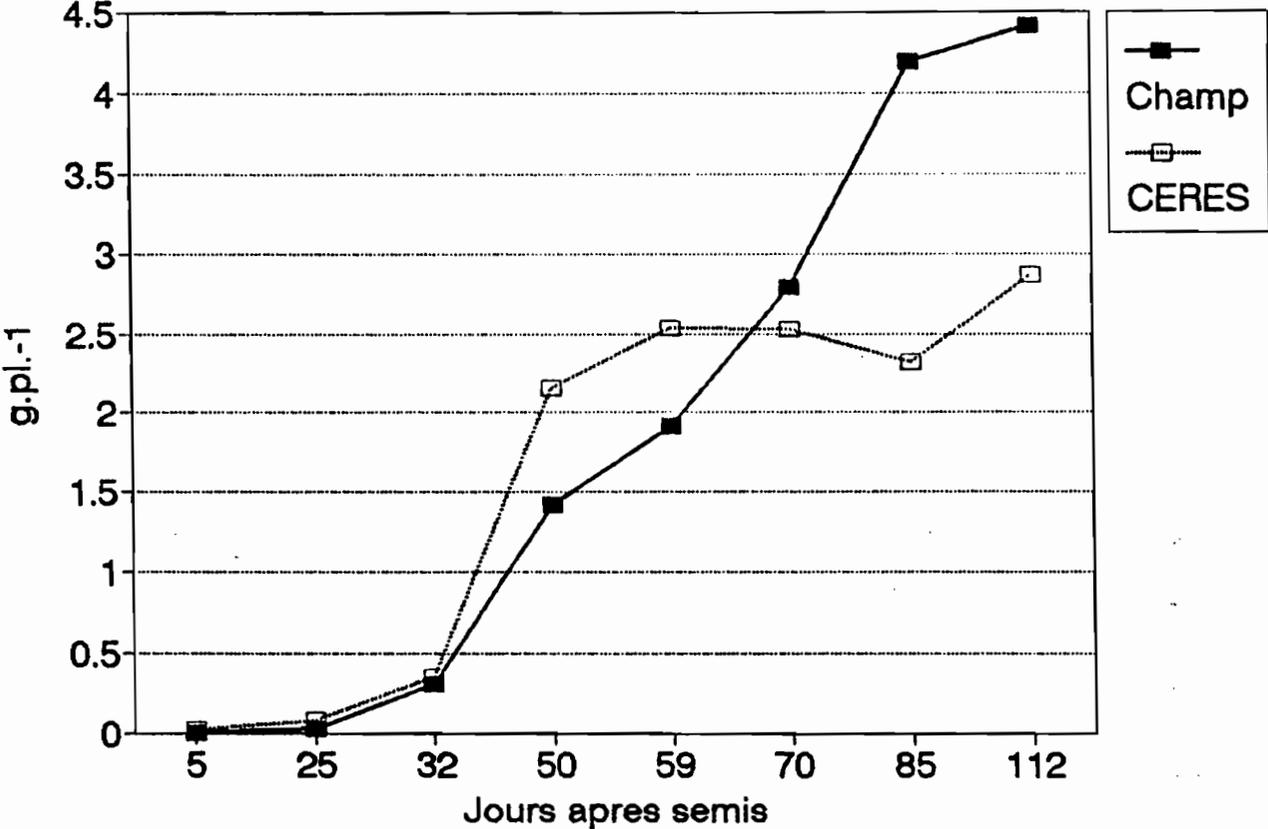
# EXPORTATION DE L'AZOTE PAR LA PLANTE

## CERES DOSE N 108



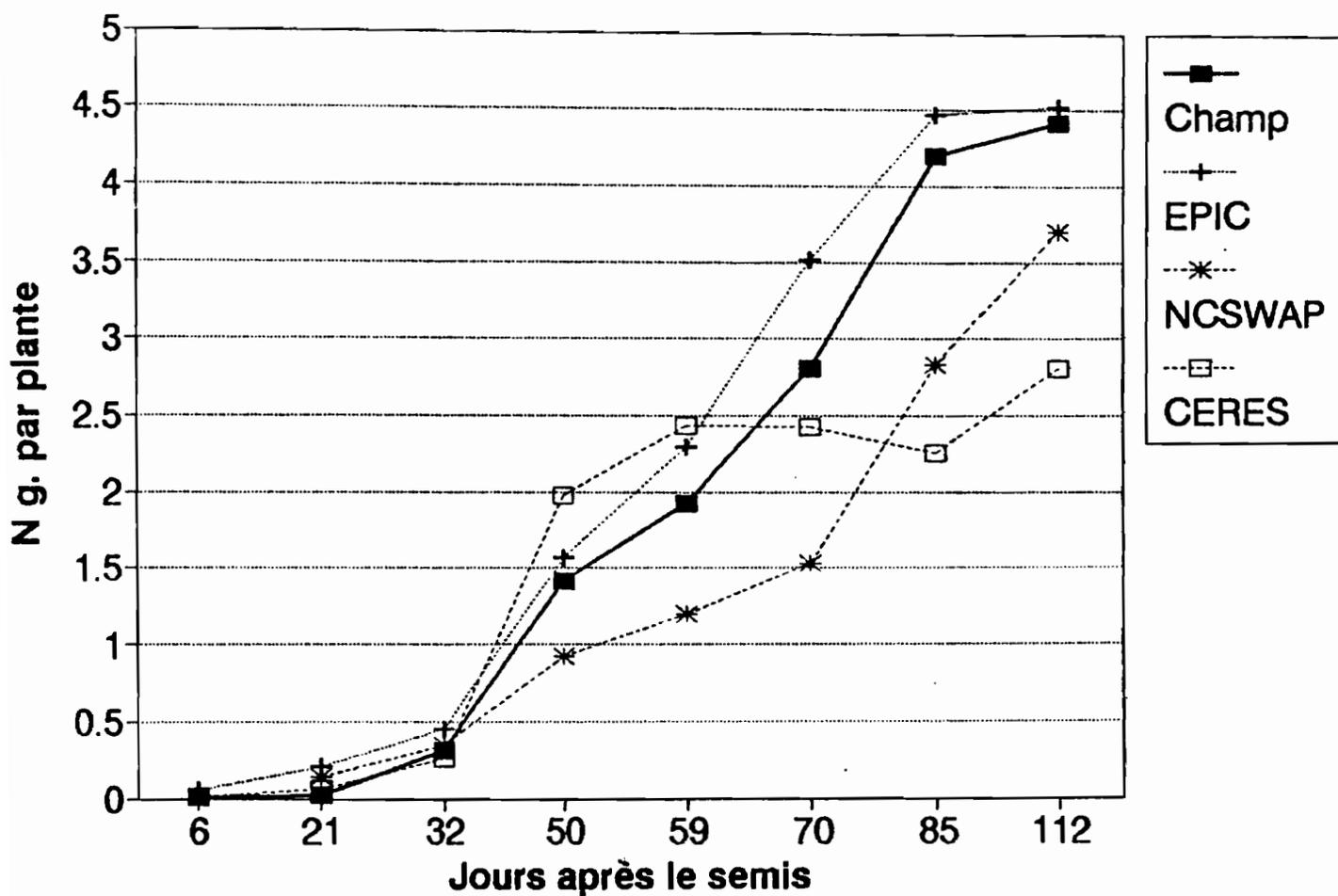
# CERES: EXTRACTION DE L'AZOTE PAR PB8

Comparaison Champ/Simul. 270 kg.ha-1



# EXPORTATION DE L'AZOTE PAR LE MAIS

## PB8 COMPARAISON DES MODELES



**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE II.1.**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## ANNEXE II.1.: EXPERIMENTATIONS SUR LA SOLUTION DU SOL

### Table des Matières

#### I. Introduction

#### II. Méthodes d'extraction et d'analyse

##### 2.1. Méthodes d'extraction

###### 2.1.1. La lysimétrie

###### 2.1.2. Le sol et les prélèvements au champ

###### 2.1.3. La procédure d'extraction

###### 2.1.4. Suivi de la nitrification en incubation

###### 2.1.5. Comparaison de l'azote minéral de la solution et de l'azote absorbé par une plante test cultivée en serre.

###### 2.1.6. Les analyses

#### III. RESULTATS

##### 3.1. Lysimétrie

##### 3.2. Suivi de la nitrification au champ

##### 3.3. Les incubations

###### 3.3.1. Différence H<sub>2</sub>O, KCl

###### 3.3.2. Evolution de l'azote minéral durant la culture

##### 3.4. Les cultures de Ray-Grass.

###### 3.4.1. Production de matière sèche

###### 3.4.2. Extraction de l'azote total et vitesse d'extraction

###### 3.4.3. Provenance de l'azote extrait

#### IV. DISCUSSION

#### V. CONCLUSIONS

## I. INTRODUCTION

Depuis presque un siècle, les analyses de caractérisation des sols servent aux pédologues et aux agronomes à comparer les sols et évaluer leur fertilité potentielle. Implicitement, la notion de fertilité est étroitement liée à celle de solution du sol depuis qu'il est admis que les plantes assurent l'essentiel de leur alimentation minérale sous forme anionique et cationique. Cependant, les difficultés de définition de la solution du sol par des méthodes physiques ou chimiques ainsi que les difficultés de dosage des éléments souvent présents à très faible concentration dans la solution du sol, ont conduit les analystes à préférer, pour chaque élément, des réactifs d'extraction spécifiques. La diversification des méthodes selon des critères chimiques a fait perdre de vue l'importance du concept de solution du sol et a privilégié pendant plus d'un demi-siècle la recherche de corrélations entre les quantités extraites par les réactifs d'une part et les récoltes d'autre part.

Mais les constructeurs de modèles simulant les relations des plantes avec les sols cultivés ont réactivé les recherches sur la solution du sol, car ils font appel à des hypothèses plus ou moins explicites sur sa composition afin de simuler le transfert des solutés avec celui de l'eau. Tous les modèles font passer constamment l'eau d'une couche à l'autre du sol en fonction des précipitations, de la conductivité hydraulique, et de l'évapotranspiration. En ce qui concerne le contenu de la solution en composés azotés, leurs hypothèses reposent sur des résultats existants qui ne sont pas nécessairement adaptés au problème posé par les rapports entre la solution du sol et la plante. Or ce problème est fondamental pour la simulation des rapports sol-plante.

En effet, les modèles tels que CERES, NCSWAP ou EPIC sont des instruments de simulation qui font appel à des descriptions dynamiques du fonctionnement des systèmes de relation entre le sol, la solution et la plante (HETIER et al. 1989). Leur calibration et validation se basent obligatoirement sur des mesures de flux de nutriments qui traversent la solution pour alimenter la plante.

En ce qui concerne l'azote, les auteurs considèrent que la solution transporte automatiquement l'azote nitrique et ammoniacal. Certains prévoient, dans le cas de l'ammonium, un coefficient de partage entre les formes libres dans la solution et les formes fixées sur les argiles comme on pourra le voir dans l'annexe I.5.

Malheureusement, il n'existe toujours pas de définition de la solution du sol universellement acceptée, du moins si l'on veut lui donner une base analytique simple (CHEVERRY 1983, GAUDIN et al. 1985, LITAOR 1988). En conséquence, les modélisateurs doivent le plus souvent utiliser les résultats d'extraction par une solution molaire de KCl pour se donner une idée de la concentration de la solution du sol en azote minéral au contact des racines. Une telle approximation est légitime en ce qui concerne les nitrates mais elle est paraît plus difficilement acceptable pour l'ammonium. Si on accepte une définition de la solution du sol basée sur une extraction par la solution molaire de KCl, l'ammonium fixé devra être défini par une extraction plus énergique. Si la solution du sol est assimilée à l'eau de gravité ou l'eau extraite à un potentiel donné, le KCl pourrait alors être utilisé pour définir l'ammonium fixé et définir le coefficient de partage évoqué plus haut. Mais la documentation des modèles en général ne précise pas sur quelles mesures se baser pour décider quel doit être la valeur de ce coefficient de partage dans le cas d'un sol donné. De plus, on suppose que la plante absorbe indifféremment l'azote minéral aussi bien sous forme nitrique que ammoniacale. Enfin, dans le cas des cultures marquées, on ne sait pas quel pourrait être le rapport entre la composition isotopique du mélange d'azote minéral issu du sol et de l'engrais à un moment donné, et ce que la plante aura pu extraire du sol cours des semaines précédentes.

Nous avons tiré de ces constatations trois questions auxquelles nous essayerons d'apporter des éléments de réponse.

Quelle est la quantité d'azote ammoniacal susceptible de migrer librement d'une couche à l'autre sous l'effet d'une pluie?

Quelle peut être la participation respective des nitrates et de l'ammonium à la nutrition azotée d'une plante test?

Une culture de plante test pourrait-elle remplacer les classiques expériences d'incubation dans la mesure où l'azote absorbé par la plante pendant un temps donné, serait représentatif de l'azote minéral présent dans le sol pendant la même période ?

Les éléments de réponse apportés par le présent travail proviennent des constatations faites d'abord sur le terrain par des mesures de lysimétrie et d'extraction d'azote minéral, puis de deux séries d'incubation et d'une culture de ray-grass qui ont été réalisées en serre avec l'horizon superficiel du sol ferrugineux tropical de Barinas durant les années 90, 91 et 92 à Mérida.

## II. Méthodes d'extraction et d'analyse

### 2.1. Méthodes d'extraction

#### 2.1.1. La lysimétrie

Depuis le mois de mai 1986 jusqu'à octobre 1991, ont fonctionné à Barinas un ensemble de six lysimètres constitués par des monolithes de 1,10 de profondeur et de 0,25 m<sup>2</sup> d'ouverture sous culture de maïs et de fourrage (*Digitaria* sp.)

Les eaux recueillies à la base du dispositif représenté dans la figure suivante étaient stabilisées par un agent bactériostatique (merthiolate de sodium) durant la phase de remplissage et de transport.

A l'arrivée au laboratoire, l'échantillon était en général limpide. Les essais effectués, ont montré que les échantillons troublés par la présence d'argile ne contenaient pas pour autant des quantités anormalement élevées d'azote. En effet, lors de la première année de mesure, une aliquote était minéralisée directement pour mesurer l'azote total. Ces mesures d'azote total nous ont suffi pour constater que les quantités d'azote organique étaient insignifiantes. Le reste de l'échantillon était distillé selon la procédure décrite dans le paragraphe des méthodes utilisées pour l'ensemble des expériences.

#### 2.1.2. Le sol et les prélèvements au champ

Toutes les expériences évoquées dans cette annexe ont été effectuées avec l'horizon superficiel du même sol ferrugineux tropical de Barinas (HETIER et al. 1993) qui a été présenté en détail dans l'annexe I et dont on répète dans les tableau les principales caractéristiques.

Sol du Jardin Botanique (UNELLEZ, Barinas)

Prof. cm	Texture(%)			pH H <sub>2</sub> O	C. %	N %	CEC cmol(+) kg. <sup>-1</sup>	Sat %	Al cmol kg. <sup>-1</sup>
	Sable	Lim.	Arg.						
0-20	69	12	18	5.6	0.7	0,06	2,4	60	0

Entre Juin et octobre 1990 a été réalisée une culture de maïs en vue de comparer la dynamique de la nitrification de l'urée en fonction de deux modes d'apport: en bande étroite latérale au semis ou sur toute la surface de l'interligne 25 jours après le semis.

Les prélèvements ont été effectués 30, 40, 60, 75, 90, 115, et 135 jours après le semis. Cinq prises d'échantillons réalisées au hasard sur la ligne ou entre les lignes des parcelles fertilisées en bande ou en surface ont servi à constituer un échantillon composite homogénéisé à l'occasion du tamisage.

### 2.1.3. La procédure d'extraction

L'extraction par l'eau et le KCl 1M consiste à agiter pendant deux heures le sol frais avec le même rapport sol-solution (50 g de sol dans 100 ml de réactif). Une fois effectuée la centrifugation (20 mn à 2000 rpm), et le rinçage du culot par agitation dans 50ml du même réactif et centrifugation, une aliquote de 100 ml d'extrait est filtrée (Whatmann N°2) et utilisée pour la distillation en différenciant les nitrates et l'ammonium selon la procédure détaillée dans le paragraphe consacré aux méthodes analytiques.

La seule différence dans le cas de l'extraction par l'eau est que, avant de centrifuger, il faut procéder à une floculation rapide à l'aide d'une quantité de sulfate d'alumine telle que la concentration dans le surnageant soit égale à  $3.10^{-4}$  M. Cette technique a été appliquée pour le suivi de la nitrification tant au champ qu'à la serre.

### 2.1.4. Suivi de la nitrification en incubation

Le sol à incuber (10 kg de sol sec à l'air tamisé à <2mm) a d'abord été homogénéisé manuellement et humidifié jusqu'à 80% de la capacité au champ.

Dans le cas du témoin, l'humidification est réalisée avec de l'eau distillée et dans le cas du traitement fertilisé, avec une solution d'urée représentant un apport de 166 mg.N.kg<sup>-1</sup> enrichi en azote 15 avec un excès isotopique de 0,78%.

La détermination initiale de l'humidité et de l'azote total de l'échantillon de sol mis à incuber nous a donné l'occasion de contrôler la qualité de l'homogénéisation obtenue. Les coefficients de variation ont tous été inférieurs à 3%.

Une fois homogénéisés, humidifiés et fertilisés, les dix kilos de sol ont été laissés au repos à l'abri de la lumière à une température qui pouvait varier entre 18°C de nuit et 30°C le jour (avec parfois des pointes à 36°C entre 12 et 14h).

Avant chaque échantillonnage hebdomadaire, le sol est ré-homogénéisé avant le prélèvement de six prises d'essai. Si nécessaire, on rajoute à cette occasion la quantité d'eau suffisante pour rétablir l'humidité initiale.

Durant la première incubation, les prélèvements ont été effectués après 1, 2, 4, 6, 10 et 14 semaines. Durant la seconde incubation (effectuée parallèlement avec la culture de plante test) les prélèvements ont été faits après 1, 3, 6 et 9 semaines.

#### 2.1.5. Comparaison de l'azote minéral de la solution et de l'azote absorbé par une plante test cultivée en serre.

Pour déterminer que la quantité minimale de terre permettant de ne pas limiter le potentiel de production de matière sèche de 250 graines de Ray-Grass, un essai préliminaire a été effectué ce qui nous a permis de savoir que cette quantité est de 1 kg par pot de culture.

Un échantillon du même sol fertilisé et marqué dans les mêmes conditions que pour l'incubation, a servi à remplir vingt pots de culture de kilo de sol sec afin de les ensemercer avec 250 graines de Ray-Grass.

Le premier lot de 10 pots a été semé immédiatement, traitement "Première culture". Pour le second lot de dix pots, le semis a été reporté de six semaines afin de permettre l'évolution du sol dans les mêmes conditions de l'incubation. Ce retard sert en particulier à donner à la nitrification le temps de se produire avant que la plante ne commence à absorber l'azote. Ce traitement sera appelé "Deuxième culture". Dans les deux traitements l'humidité du sol a été maintenue constante en contrôlant le poids des pots, le poids de matière sèche photosynthétique étant considérée comme négligeable.

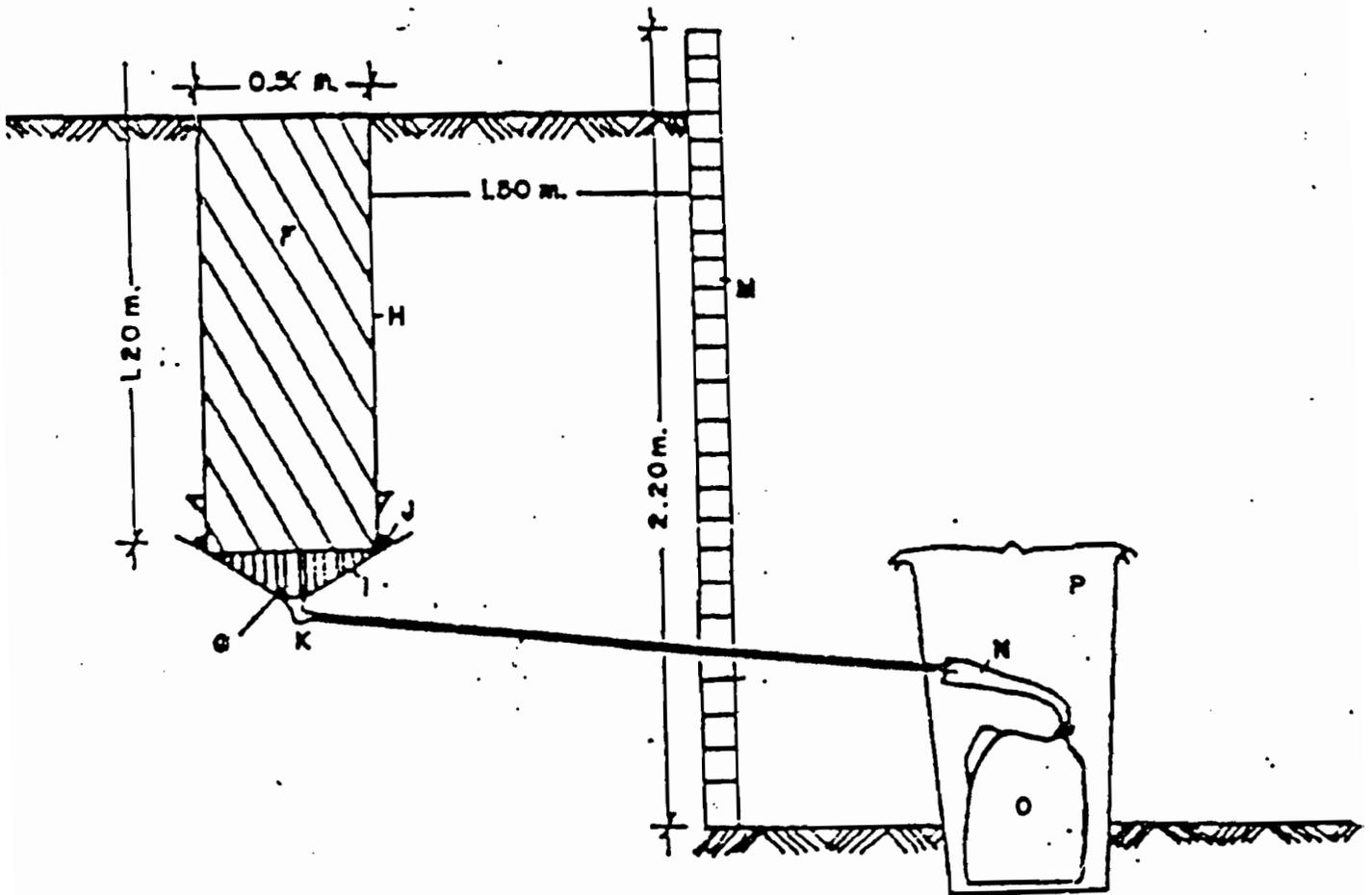
Lors de la première culture, les coupes de parties aériennes de ray-grass ont été effectuées après 3,6,9 et 15 semaines. Pour la Seconde Culture 3,6, et 9 semaines après le semis. A l'occasion de chaque coupe, deux pots ont été sacrifiés afin de mesurer le poids des racines et leur concentration en azote dérivé du sol et du fertilisant. En outre, une aliquote du sol des pots sacrifiés a servi à effectuer une extraction identique à celle du sol mis en incubation.

#### 2.1.6. Les analyses

L'azote total a été mesuré dans les échantillons de sols et de plante par la méthode KJELDAHL OLSEN modifiée par GUIRAUD et FARDEAU (1977).

Dans les extraits liquides, l'azote ammoniacal et nitrique a été mesuré par la méthode de BREMNER décrite par GUIRAUD (1984), et qui consiste en une distillation directe en présence de magnésie calcinée pour l'azote ammoniacal, et une deuxième distillation après réduction par l'alliage de DEWARDA pour les nitrates.

MODELE DE LYSIMETRE EMPLOYE



Les lysimètres sont des monolithes de 300 l de sol avec une ouverture de  $\frac{1}{4}$  de m<sup>2</sup>. Ils ont été mis en place en enfonçant progressive ment le cylindre de tôle galvanisée et ont fonctionné durant quatre ans sous maïs (1 pied par lysimetre) ou sous fourrage (*Digitaria decumbens*)

Dans les deux cas, la titration se fait, par retour dans l'acide sulfurique dilué qui a servi à piéger l'ammonium séparé par distillation, à l'aide d'un micro-titrateur Mettler. Tous les échantillons solides ou liquides ont fait l'objet de trois répétitions analytiques. Les résultats d'azote total seront exprimés en milligrammes d'azote par kilo de sol sec: mg.N.kg<sup>-1</sup>.

Les teneurs isotopiques en Azote quinze ont été mesurées par spectrométrie optique (SOPRA GS1) après transformation du sulfate d'ammonium issu de la distillation en azote moléculaire N<sub>2</sub> par action oxydante de hypobromite de Li dans un dispositif conçu par ROSS et MARTIN puis modifié par GUIRAUD (1984). Les résultats isotopiques apparaissent sous trois formes:

- Excès isotopique
- NDF (% de l'azote de l'échantillon qui dérive du fertilisant)
- CRU (Coefficient réel d'utilisation du fertilisant c'est à dire pourcentage du traceur introduit que l'on retrouve dans l'azote de l'échantillon.)

### III. RESULTATS

#### 3.1. Lysimétrie (Tableau A2.1.1.)

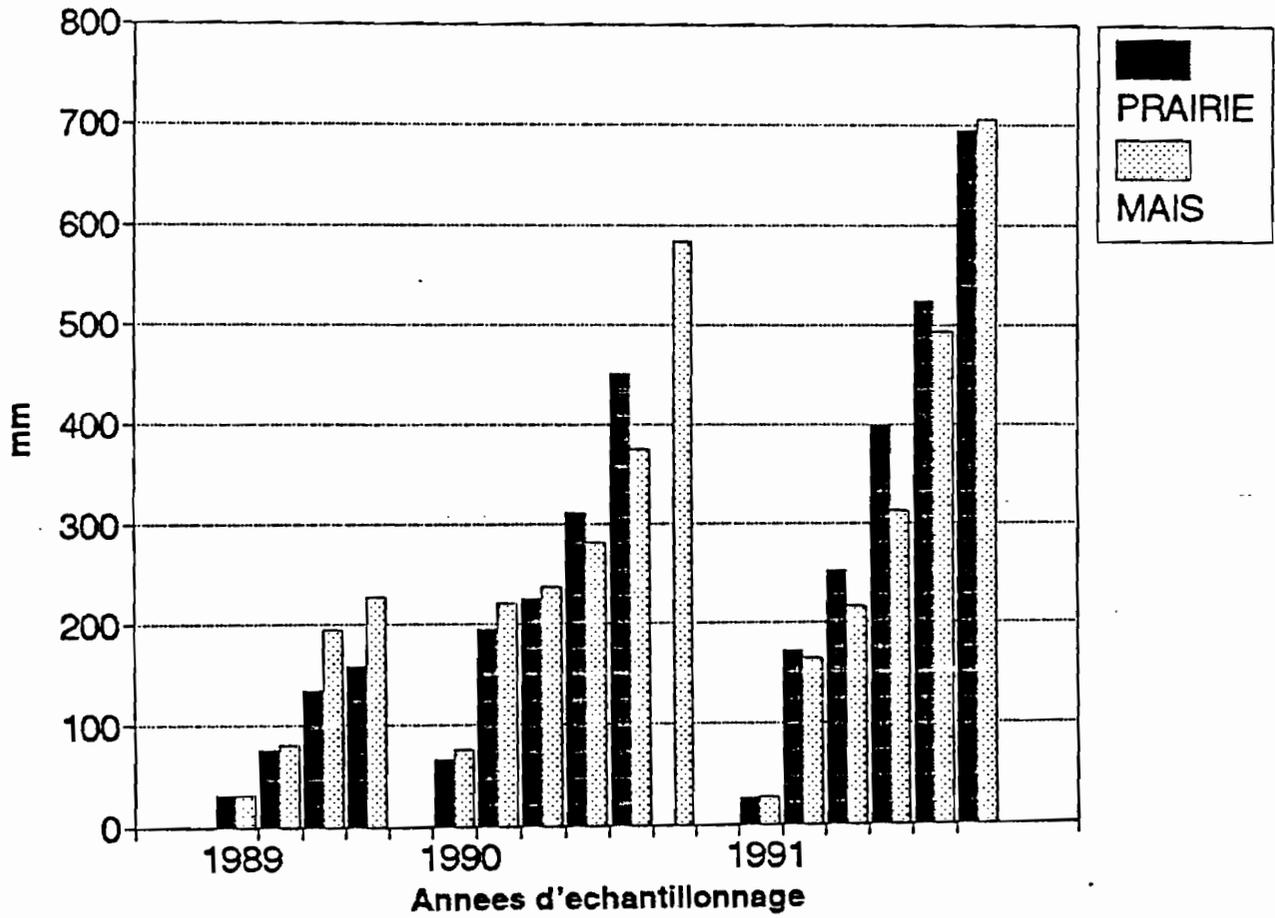
Les deux premières années de mesures ont suffi pour démontrer que nature de la couverture végétale ne provoquait pas de différence en ce qui concerne la quantité d'eau filtrée qui représente environ la moitié des précipitations (ACEVEDO.1987). La différence entre les deux cultures se manifeste seulement à niveau de la concentration en Azote des eaux recueillies.

Dans le cas du fourrage, ne sortent que 5 kg.N.ha<sup>-1</sup> au total dont 1 seulement dérive du fertilisant durant les deux premières années. Dans le cas de la culture de maïs, les pertes par lixiviation atteignent 25 kg.N.ha<sup>-1</sup> dont environ 5kg dérivent du fertilisant (HETIER et al. 1989). Compte tenu de l'imprécision de ce genre de mesure, il faut voir là des ordres de grandeur mais ils sont tellement différents des résultats obtenus sous climat tempéré dans des dispositifs analogues, que l'on peut être sûr qu'ils nous signalent une différence importante dans le fonctionnement du système sol-plante. En effet après une culture de maïs marqué nous avons observé dans le sud de la France (lysimètres de la station ITCF-CEA de GREBOUX) des pertes par lixiviation de l'ordre de 200 à 300 kg (CHOTTE 1986) liées aux pluies d'hiver tombant sur sol nu après la récolte.

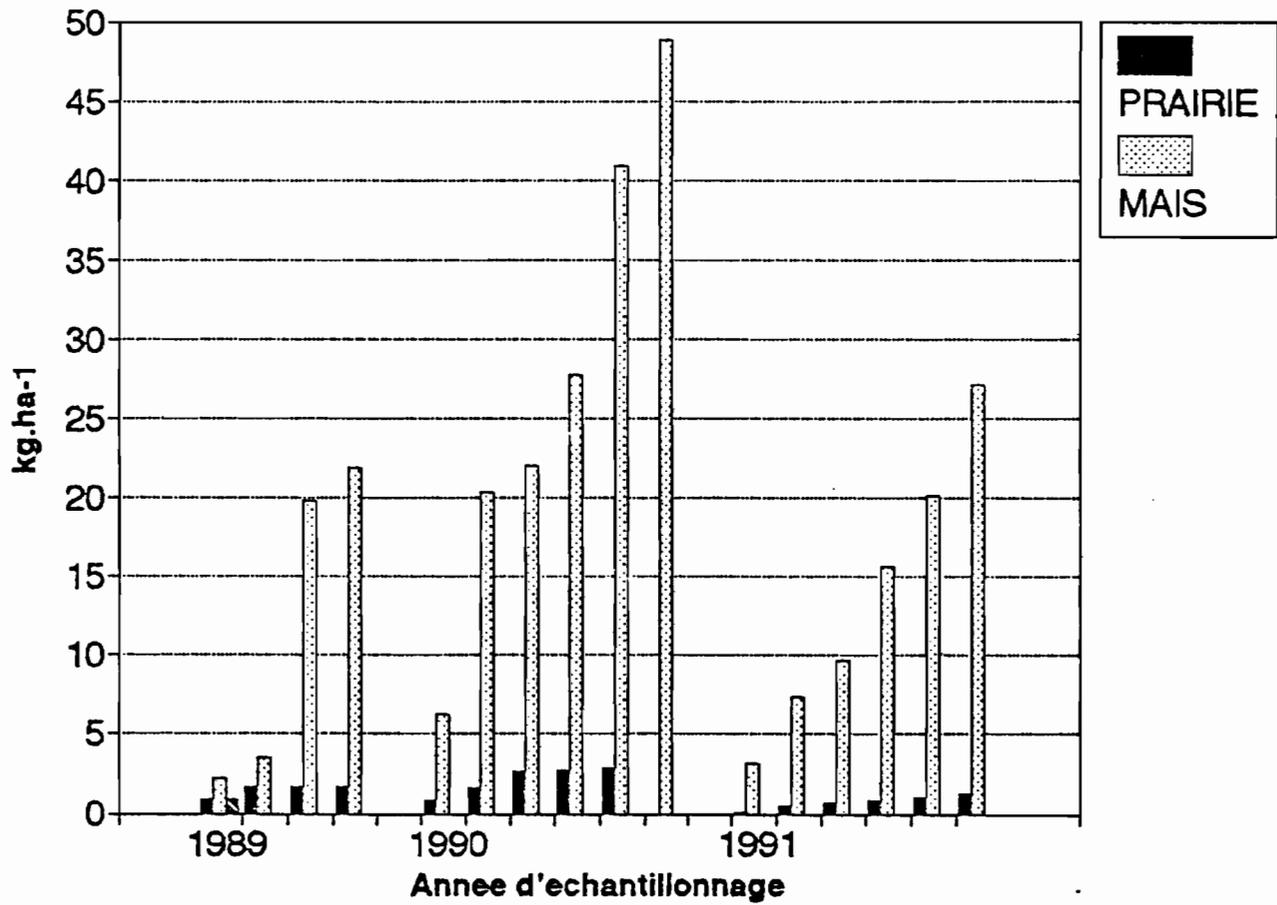
Tableau A2 1.1. Lixiviation sous Prairie (P) et sous Mais (M)

Annee	Litres		Cumul mm		Concentration		Q QN m		QN cumule	
	C.V. 35 %				mgN. CV 1%				kg.Ha-1	
	P	M	P	M	P	M	P	M	P	M
1989	8	9	31	36	3.0	6.1	23	54	0.9	2.2
	11	13	75	86	1.7	2.7	19	34	1.7	3.5
	15	29	134	200	0.1	14.2	1	407	1.7	19.8
	6	8	159	232	0.0	6.3	0	51	1.7	21.9
1990	17	19	66	75	1.2	8.3	20	155	0.8	6.2
	32	37	195	221	0.6	9.7	20	354	1.6	20.3
	8	4	226	237	3.3	10.6	25	42	2.6	22.0
	22	11	312	281	0.1	12.9	2	142	2.7	27.7
	35	24	452	375	0.0	14.0	1	330	2.8	40.9
		52	583		3.8		198		48.9	
1991	6	7	25	27	0.1	11.5	1	79	0.0	3.1
	37	35	172	165	0.3	3.1	11	106	0.5	7.4
	20	13	252	217	0.2	4.4	5	57	0.7	9.7
	37	24	398	313	0.1	6.2	4	148	0.8	15.6
	32	45	525	493	0.1	2.6	3	115	1.0	20.2
	43	53	695	705	0.2	3.3	7	175	1.2	27.2

# DRAINAGE CUMULE



## CUMUL DE L'AZOTE LIXIVIE



Il est évident que la composition des solutions qui ont percolé à travers plus d'un mètre de sol ne reflète que de loin celle de la solution du sol au contact des racines. Cependant la différence observée entre les deux cultures nous montre bien que ces mesures lysimétriques donnent les ordres de grandeur des concentrations minimales que l'on peut trouver dans la solution du sol des deux cultures à savoir 0 à 3 mgN.l<sup>-1</sup> sous fourrage et 3 à 14 sous maïs.

Pour confirmer la valeur de cette indication, nous pourrions la comparer avec les valeurs de concentration d'azote mesurées en surface pendant une culture de maïs effectuée en 1990 pendant la saison des pluies, pendant les incubations et pendant les cultures réalisées en serre avec le même sol.

### 3.2. Suivi de la nitrification au champ (Tableau A2.1.2.)

Compte tenu des pluies violentes qui ont suivi la fertilisation en 1990 et de la variabilité spatiale qui caractérise l'azote minéral, il n'est pas possible d'interpréter les résultats obtenus autrement que comme des ordres de grandeur semi-quantitatifs.

Cependant, ils nous permettent de percevoir certaines caractéristiques des équilibres entre formes nitriques et ammoniacales après une fertilisation par l'urée.

Tout d'abord, aucune différence n'apparaît au niveau des concentrations en azote minéral prélevé dans la ligne ou entre les lignes quelque soit le mode d'apport. Cette constatation résulte probablement des fortes pluies qui ont succédé à la fertilisation et qui ont dilué et réparti immédiatement l'urée.

Deuxièmement, les concentrations d'azote nitrique sont pratiquement toujours supérieures à celles d'azote ammoniacal, aussi bien dans l'horizon de surface que au dessous des 20 premiers cm et ceci dès la semaine qui suit la fertilisation. Les variations de concentrations en fonction des épisodes pluvieux sont d'importance égale à celles que provoque la fertilisation.

En fin de culture, on retrouve des valeurs semblables à ce que l'on mesure habituellement avant la fertilisation à savoir des valeurs fluctuant autour de 10 mg.kg<sup>-1</sup> pour les nitrates et autour de 3 pour l'ammonium soit environ 30 kg.N.ha<sup>-1</sup> d'azote minéral total.

Tableau A2 1.2. Azote mineral au champ

a : Uree apportee en surface

Échantil- onage	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4
Sur ligne														
LS 0-20	6.2	1.6	8.2	6.4	12.6	1.6	12.0	4.0	2.4	3.4	4.5	4.8	3.6	4.0
LS 20-40	7.8	6.6	8.8	5.4	9.2	1.8	14.0	7.4	3.6	1.4	3.8	5.8	1.6	2.0
Entre ligne														
ELS 0-20	14.6	16.4	13.4	2.0	9.4	1.4	12.4	8.0	1.2	5.4	5.6	4.6	4.8	4.0
ELS 20-40	5.0	0.8	10.0	0.4	1.2	0.2	12.6	7.2	3.2	2.0	4.8	5.2	2.4	2.2

b : Uree apportee en Bande

Échantil- onage	P1		P2		P3		P4		P5		P6		P7	
	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4	NO3	NH4
Sur ligne														
BLB 0-20	4.0	1.6	2.8	0.0	11.2	2.0	3.8	3.4	4.2	4.8	8.0	1.2	3.4	3.8
BLB 20-40	1.4	0.8	3.0	0.0	12.2	1.2	4.2	2.0	2.6	3.8	6.6	0.8	2.4	1.2
Entre ligne														
ELB 0-20	3.4	0.2	6.6	0.0	3.6	2.2	6.8	3.8	4.4	5.0	8.4	1.4	5.0	3.6
ELB 20-40	2.4	1.2	6.0	1.6	8.0	0.0	1.2	2.2	3.0	3.8	4.2	0.6	2.8	1.8

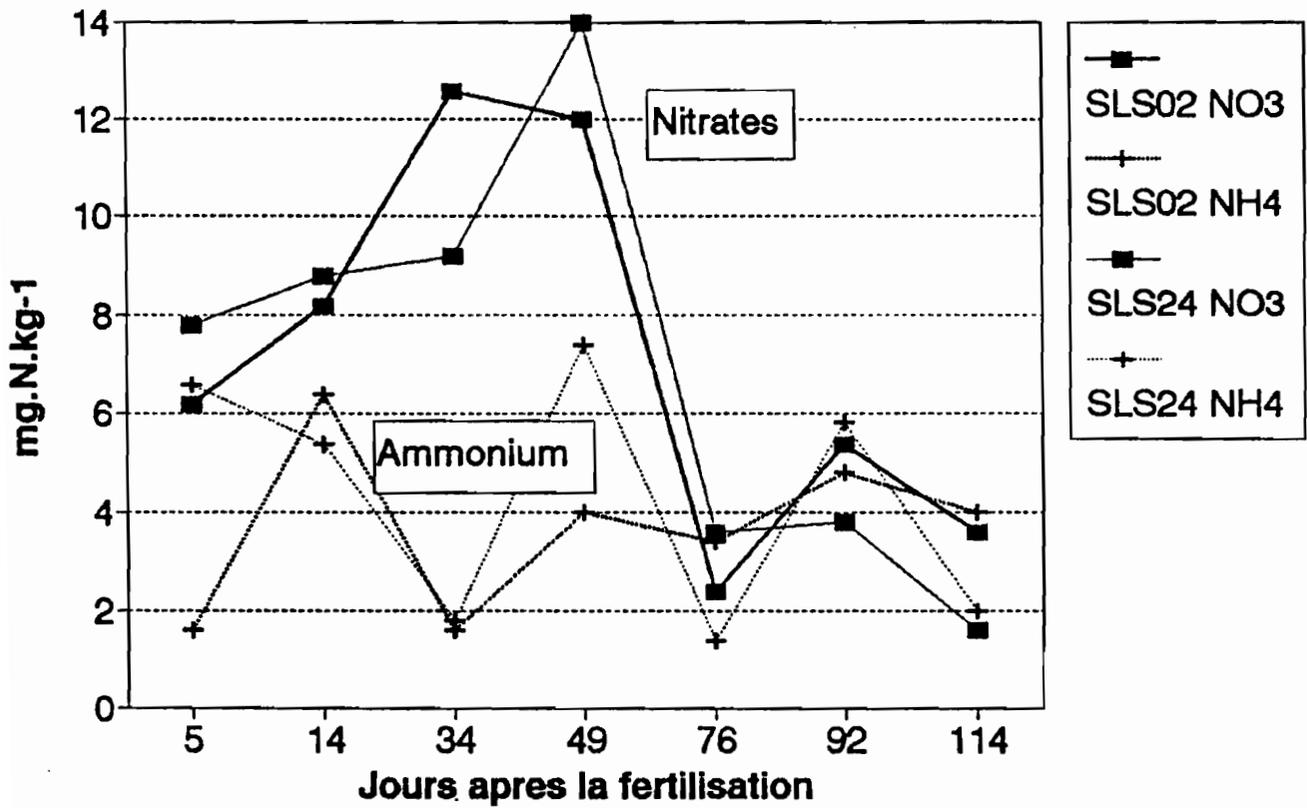
Date de semis : 10.06.90

Fertilisation : 150 kg.N.ha-1 sous forme Uree le 11.07.90

N.V. dans l'échantillon composite 20 a 30 %

# UREE APPORTEE EN SURFACE

Evolution de NO<sub>3</sub> et NH<sub>4</sub>



### 3.3. Les incubations

#### 3.3.1. Différence H<sub>2</sub>O, KCl (Tableau A2.1.3.)

Comme on pouvait s'y attendre, les concentrations en nitrates sont identiques dans les deux extractions. L'ammonium est deux fois plus abondant dans le KCl au début de l'incubation quand les concentrations d'ammonium dérivée de l'urée sont supérieures à 50 mg.N.l-1. Par la suite, la différence tend à diminuer et au bout de 14 semaines d'incubation les deux concentrations sont presque identiques dans l'eau et le KCl.

Cette dernière constatation constitue un imprévu qui devrait faire l'objet d'une petite recherche complémentaire en comparant plusieurs types de sol. En effet, si les modèles doivent tenir compte d'un coefficient de partage entre formes libres et formes fixées de l'azote ammoniacal, un tel coefficient de partage doit être modulé en fonction de la concentration et du type d'argile. Ce serait en effet un erreur de croire à une uniformité des sols tropicaux qui s'opposerait à une plus grande diversité des sols tempérés (SCHWERTMANN et al.1992). Nous avons là un premier exemple des efforts qui restent à faire pour que les modèles puissent simuler efficacement le cycle de l'azote dans les cultures tropicales.

Mais dans le cadre de ce travail exploratoire, nous ne disposons que d'un d'un seul taux et d'un seul type d'argile. La seule autre information que l'on peut essayer de tirer de cette expérience concerne la provenance de l'ammonium.

Si on observe les valeurs de NDF des extraits, on constate que dans les deux réactifs l'ammonium dérive du fertilisant dans la même proportion tout au long de l'incubation. On peut donc en déduire l'existence d'un équilibre instantané entre les deux formes libre et échangeable: la forme échangeable alimente la forme soluble en fonction de la disparition de l'ammonium qui alimente la nitrification. En effet, en fin d'incubation l'azote nitrique a le même excès isotopique que l'ammonium alors qu'en début d'expérience, le peu de nitrate présent vient seulement du sol. Il s'est donc formé au bout de 14 semaines un ensemble d'azote minéral probablement en équilibre avec au moins la partie de la biomasse qui a contribué au processus d'homogénéisation.

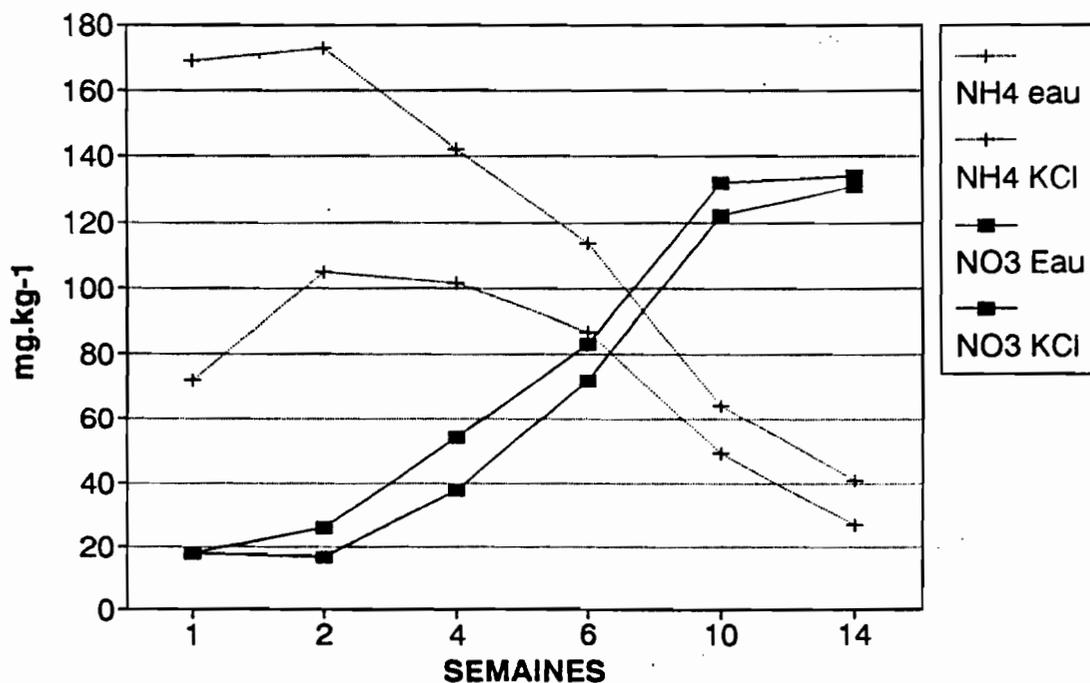
La seconde incubation réalisée parallèlement à la culture de Ray-Grass a confirmé les résultats de la première à part le fait que la nitrification a été accélérée par une température plus élevée. Dans ce cas l'homogénéisation de l'azote minéral est plus rapide encore.

**Tableau A2 1.3. Incubation**

**Comparaison de l'azote mineral dose dans l'eau et le KCl**

Semaines Echantillon	1	2	4	6	10	14
<b>NH4 Eau</b>						
mg.kg-1	72	105	102	87	49	27
NDF %	99	99	97	95	89	82
<b>NH4 KCl</b>						
mg.kg-1	169	173	142	114	64	41
NDF %	100	100	99	97	92	84
<b>NO3 Eau</b>						
mg.kg-1	18	26	54	83	132	134
NDF %	37	50	73	79	85	82
<b>NO3 KCl</b>						
mg.kg-1	18	17	38	72	122	131
NDF %	36	51	73	81	85	86

**NITRIFICATION DU SOL FERTILISE**  
**Comparaison Eau KCl**



Ces résultats semblent légitimer la pratique qui consiste à utiliser le KCl comme réactif représentant la solution du sol en ce qui concerne l'azote minéral. En effet, la partie de l'ammonium qui n'est pas entraînée un jour par la percolation de l'eau de pluie le sera les jours suivants et l'erreur initiale sera vite compensée. Mais dans ce cas là il vaudrait mieux ne pas utiliser un coefficient de partage constant qui introduira une erreur plus grande que si on ne faisait rien. Ou alors il faut baser ce coefficient non pas sur la différence entre l'eau et le KCl mais entre le KCl et un réactif plus drastique encore qui puisse extraire une hypothétique catégorie d'ammonium non échangeable. Une telle catégorie, si elle existe, pourrait-elle représenter un apport d'azote appréciable pour les plantes? Pour pouvoir en juger il faut maintenant faire appel aux résultats de l'évolution de l'azote minéral pendant la culture de plante test.

### 3.3.2. Evolution de l'azote minéral durant la culture

Dans le cas de la première culture, l'azote minéral encore présent au bout de trois semaines est de l'ordre de 70 mg.N.kg<sup>-1</sup> soit la moitié de ce que l'on trouve à la même époque dans l'échantillon en incubation. Cette quantité est également répartie entre nitrates et ammonium. Ceci constitue une autre différence avec l'incubation dont la caractéristique principale est l'accumulation des nitrates. A mesure que disparaissent ensuite les nitrates et l'ammonium de la solution, leur excès isotopique diminue fortement ce qui signifie que la minéralisation de l'azote organique du sol continue mais ne compense pas l'organisation et l'absorption par la plante. En début de culture, la quantité d'azote minéral présent au moment de la coupe (66 mgN.kg<sup>-1</sup>) est encore supérieure à l'azote absorbé en trois semaines. Mais, dès la deuxième coupe, la quantité absorbée est bien supérieure à l'azote minéral présent au moment de chaque coupe.

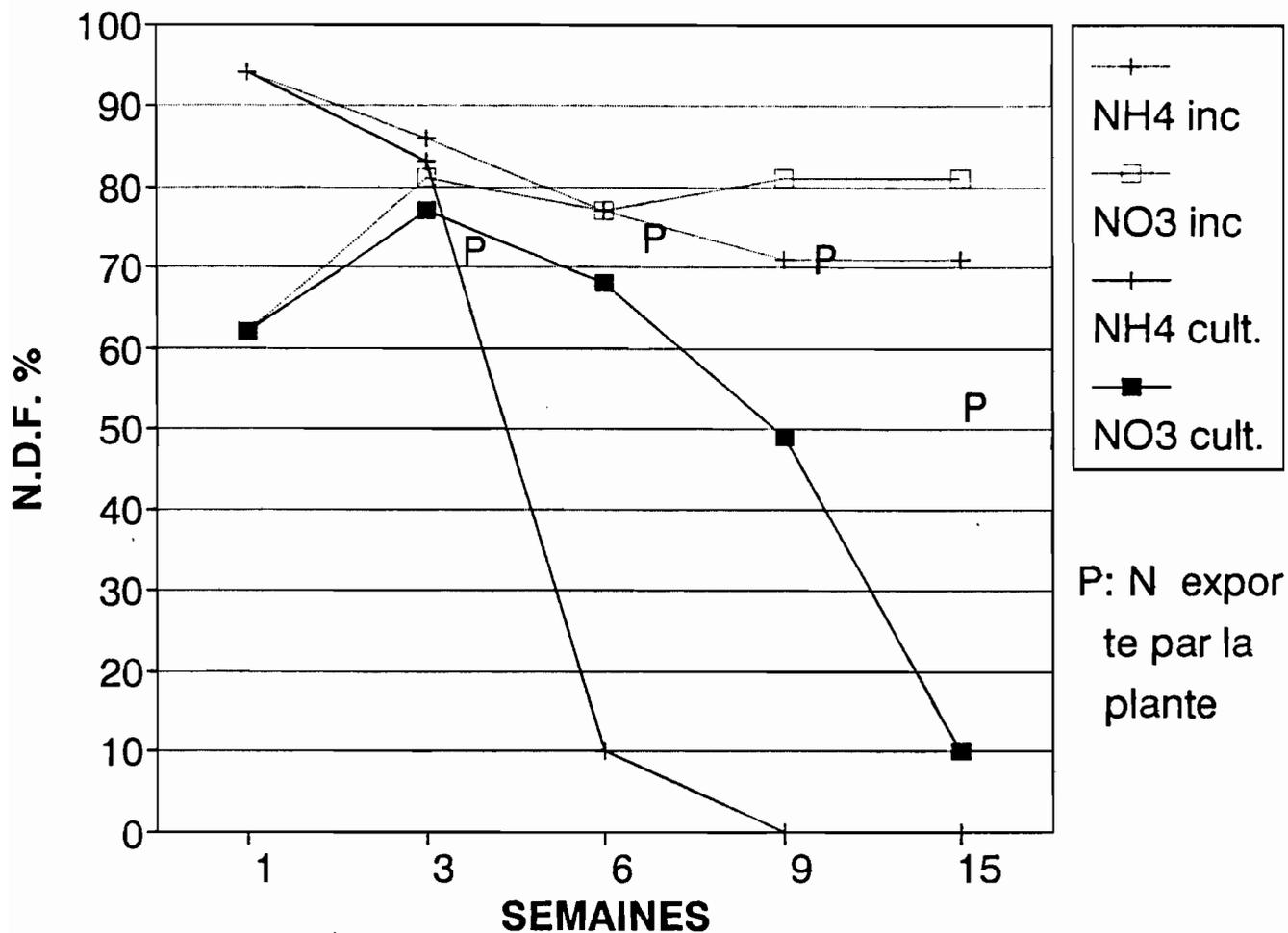
La somme de l'azote présent et de l'azote absorbé est toujours inférieure à l'azote minéral présent à la même époque en incubation. De plus, on trouve en incubation une accumulation de nitrates plus riche en azote dérivé du fertilisant que celui qui est absorbé par la plante.

En vue de la simulation du cycle de l'azote en présence de culture fertilisée, nous retiendrons tout d'abord de ces résultats l'idée que l'évolution de l'azote minéral est bien différente en présence de plante. Les modifications sont quantitatives et qualitatives: en présence de plante, la minéralisation nette est moindre et l'accumulation de nitrates bien inférieure. De plus, ces nitrates dérivent beaucoup plus du sol que du fertilisant.

**Tableau A2.1.4. Evolution de l'azote mineral durant l'incubation et la premiere culture**

Echantillon	Semaines d'incubation ou de culture				
	1	3	6	9	15
<b>Incubation</b>					
NH4 mg.kg-1	74.01	51.52	33.37	21.28	
NDF %	94	86	77	71	
NO3 mg.kg-1	24.29	79.08	122.36	146.36	
NDF %	62	81	77	81	
N min mg.kg-	98.30	130.60	155.73	167.64	
NDF %	86	83	77	80	
<b>Culture</b>					
NH4 mg.kg-1		32.04	1.33	0.00	0.86
NDF %		83	10	0	0
NO3 mg.kg-1		34.00	14.37	5.16	2.36
NDF %		77	68	49	10
N min mg.kg-		66.04	25.70	5.16	3.22
NDF %		80	39	49	7
Plante mg.kg.-1		40	48	20	8
NDF Plante		71.00	74.00	72.00	55

## PROVENANCE DE L'AZOTE MINERAL durant l'incubation et la 1ere culture



Voyons maintenant ce qui se passe au terme de la pré-incubation et après le semis de la deuxième culture.

Au bout de six semaines de pré-incubation, donc au moment du semis, on est en présence de 160 mg.N.kg<sup>-1</sup> dont 120 sous forme nitrique, le tout dérivant à 77% du fertilisant.

Trois semaines après, il ne reste plus que 84 mg.N.kg<sup>-1</sup> d'azote minéral dont 79 mg.N.kg<sup>-1</sup> d'azote nitrique qui est toujours aussi marqué que précédemment. En anticipant un peu sur les résultats d'extraction d'azote par la plante test, exposés en détail dans le paragraphe suivant, nous pouvons déjà signaler que la différence de 76 mg.N.kg<sup>-1</sup> se retrouve en partie dans la plante (33 mg.N.kg<sup>-1</sup> dont 5 dans les racines) mais ne dérive qu'à 50% du fertilisant. Par contre, la plante a utilisé de l'azote dérivé du sol pendant que l'azote du fertilisant s'est organisé.

Trois semaines plus tard, on trouve encore 71 mg.N.kg<sup>-1</sup> d'azote minéral dont 69 sous forme nitrique dérivant à 74 % du fertilisant. Pendant ce laps de temps, la plante a absorbé 74 mg.N.kg<sup>-1</sup> (dont 18 dans les racines) dérivant à 55 % du fertilisant. Pour expliquer ce résultat, soit il faut admettre que les nitrates n'ont pas participé à la nutrition de la plante, soit que la quantité d'azote nitrique absorbé ait été compensée par la minéralisation et la nitrification et que la plante utilisait également un source d'azote moins marquée.

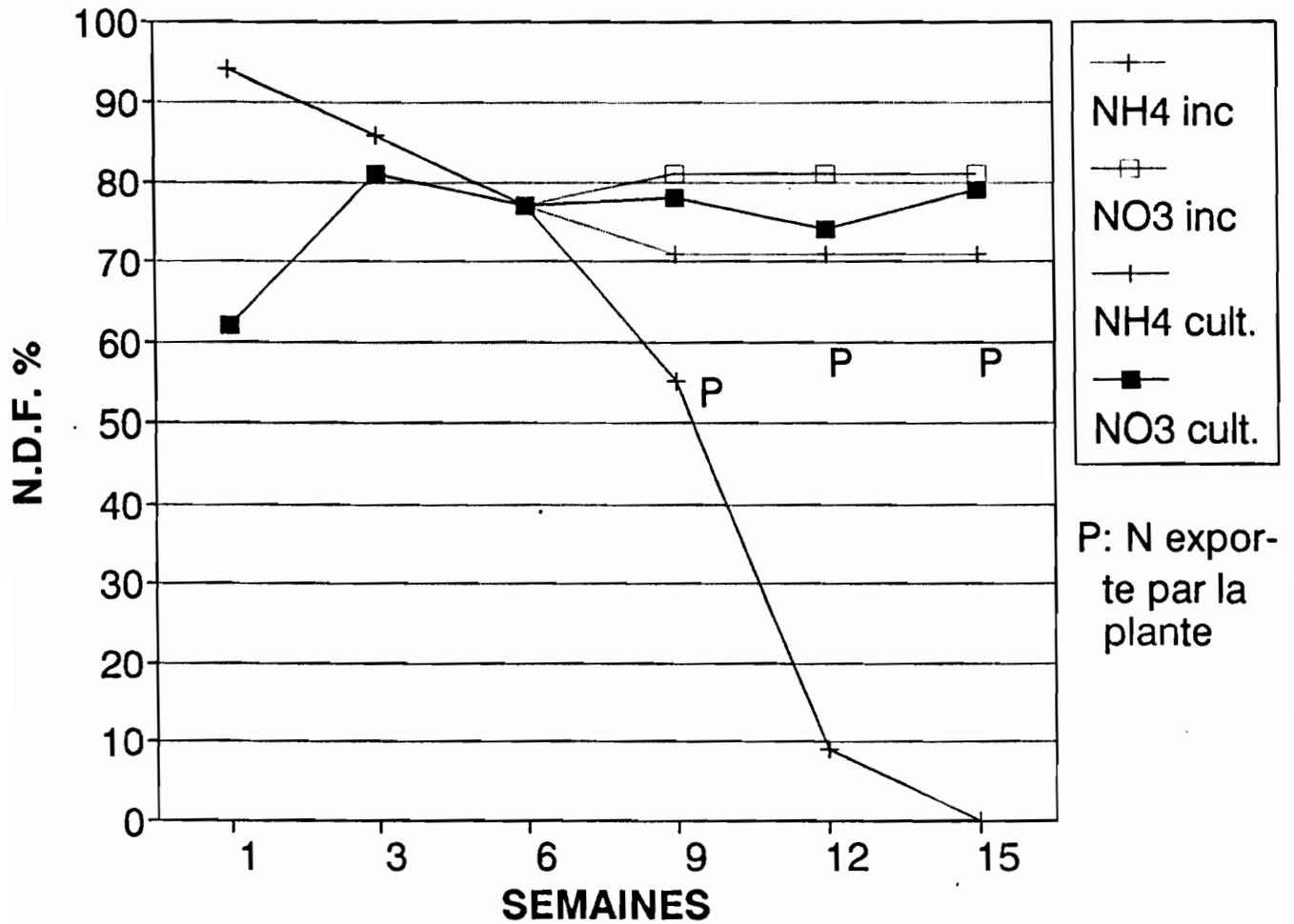
Lors de la dernière coupe, l'azote nitrique est toujours présent et toujours aussi marqué. La plante continue elle aussi à s'alimenter à partir d'une source d'azote identique à celle qui a assuré la nutrition de la deuxième coupe.

Ce n'est pas l'objectif du présent travail d'élucider dans tous leurs détails les équilibres compliqués entre minéralisation et organisation brutes. Par contre, la première idée importante qu'il faut retenir de tout ceci est qu'il n'est pas possible d'admettre que la plante utilise d'abord l'azote minéral avant de faire appel à la minéralisation des réserves d'azote organique plus ou moins anciennes du sol. Toute simulation qui s'appuie sur ce postulat ne pourra pas donner de bons résultats. La deuxième idée est que dans tous les cas l'azote ammoniacal disparaît rapidement en présence de plante ce qui n'est par forcément vrai de l'azote nitrique.

**Tableau A2.1.5. Evolution de l'azote mineral durant l'incubation et la seconde culture**

Echantillons Incubation	SEMAINES D'INCUBATION					
	1	3	6	9	12	15
NH4 mg.kg-1	74.01	51.52	33.37	21.28	21.28	21.28
NDF %	94	86	77	71	71	71
NO3 mg.kg-1	24.29	79.08	122.36	146.36	146.36	146.36
NDF %	62	81	77	81	81	81
N min mg.kg-1	98.30	130.60	155.73	167.64		
NDF %	86	83	77	80		
<b>Culture</b>						
NH4 mg.kg-1	74.01	51.52	33.37	4.44	1.94	1.43
NDF %	94	86	77	55	9	0
NO3 mg.kg-1	24.29	79.08	122.36	79.46	68.62	70.66
NDF %	62	81	77	78	74	79
N min mg.kg-1				83.90	70.56	72.09
NDF %				77	72	77
N Plante mg.kg.-1				28	56	26
NDF Plante				53.00	58	58

## PROVENANCE DE L'AZOTE MINERAL durant l'incubation et la 2de culture



### 3.4. Les cultures de Ray-Grass.

#### 3.4.1. Production de matière sèche

La première culture semée directement après la fertilisation, se caractérise par une production de matière sèche anormalement faible en ce qui concerne les parties aériennes et un développement anormalement élevé des racines après la troisième coupe. Au total, la matière sèche photosynthétisée durant les quinze semaines de culture atteint presque 7 grammes (6,9 g.kg<sup>-1</sup> de sol sec).

La croissance de la seconde culture, semée six semaines après la fertilisation a été bien différente. Si on compare avec la première culture la production de parties aérienne est supérieure (+1,76 g) et moindre celle des racines (-1,35 g). Au bout de neuf semaines, le total de matière sèche photosynthétisée est supérieur à sept grammes (7,4 g.kg<sup>-1</sup>).

Tout se passe comme si les fortes concentrations d'ammonium dérivé de l'urée avaient perturbé le développement de la première culture alors que les six semaines d'organisation et de nitrification réalisées durant la pré-incubation, créent des conditions beaucoup plus favorable à la production de matière sèche.

L'extrapolation de ces valeurs sur la base de 3000 Tm de terre dans les 20 premiers cm d'une parcelle d'un hectare donnerait respectivement 13 et 18 Tm de parties aériennes et 7 et 3 Tm de racines. Ce sont là des ordres de grandeur tout à fait comparables avec ce que donne la *Digitaria* au champ.

#### 3.4.2. Extraction de l'azote total et vitesse d'extraction

Les parties aériennes des deux cultures ont extrait au total un peu plus de 100 mg d'azote total dont plus de 80 mg se retrouvent dans les deux premières coupes caractérisées par des concentrations élevées d'azote dans les tissus (environ 5% dans la première coupe).

La vitesse d'extraction correspondante est de l'ordre de 2 mgN.kg<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>, durant les six premières semaines puis ce rythme baisse d'abord à 1 mg.N.kg<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup> puis à 0,5 mgN.kg<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>. En considérant les deux cultures dans leur ensemble on peut considérer un taux moyen de prélèvement de l'ordre de 1mg.kg<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>.

Une telle vitesse d'extraction extrapolée au champ pour une culture de 100 jours correspond à 3 kg.N.ha<sup>-1</sup>.j<sup>-1</sup>. On pourrait considérer cette valeur comme le maximum que pourrait donner ce sol fertilisé. Une telle valeur, comparée à l'extraction réelle du

Tableau A2 1.6. Cultures de Ray-Grass sans et avec préincubation

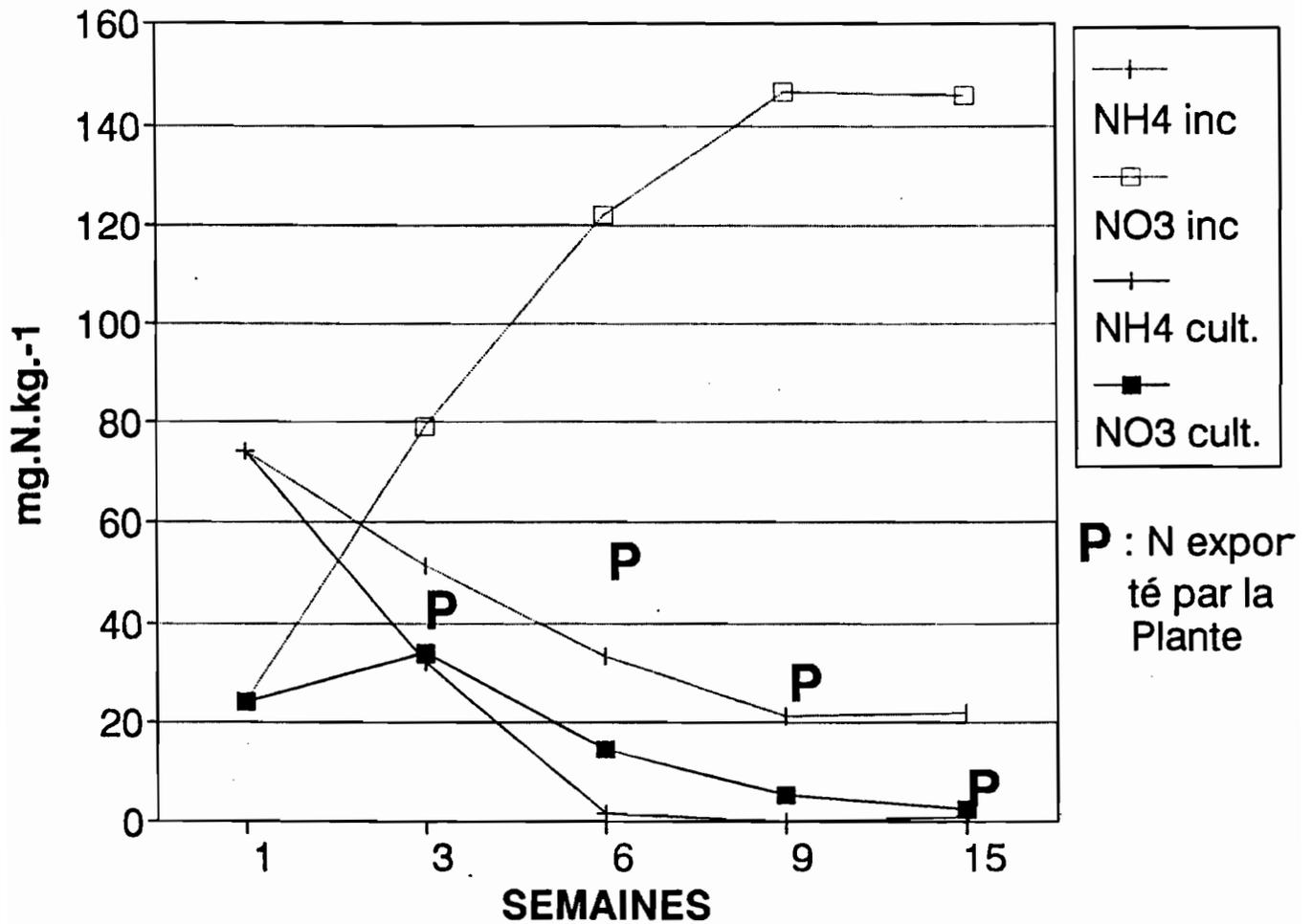
A : sans preincubation

Coupes successives	M.S. mg.kg-1	N %	Q N mg.kg-1	E %	N.D.F. %	C.R.U. %
N total initial			766			
Coupe 1.	710	5.70	40	0.55	70.51	20
2.	1438	3.32	48	0.58	74.36	25
3.	1142	1.75	20	0.56	71.79	10
4.	1145	0.69	8	0.43	55.13	3
TOTAL P.A.	4435		116	0.56	71.27	58
Racines c.4	2520	1.00	25	0.37	47.44	8
TOTAL	6955		141			66
N MINERAL			3	0.38	48.72	1
N BIO			66	0.05	6.41	3
N sol final			540	0.07	8.97	34
Bilan N et 15N en %			98			104

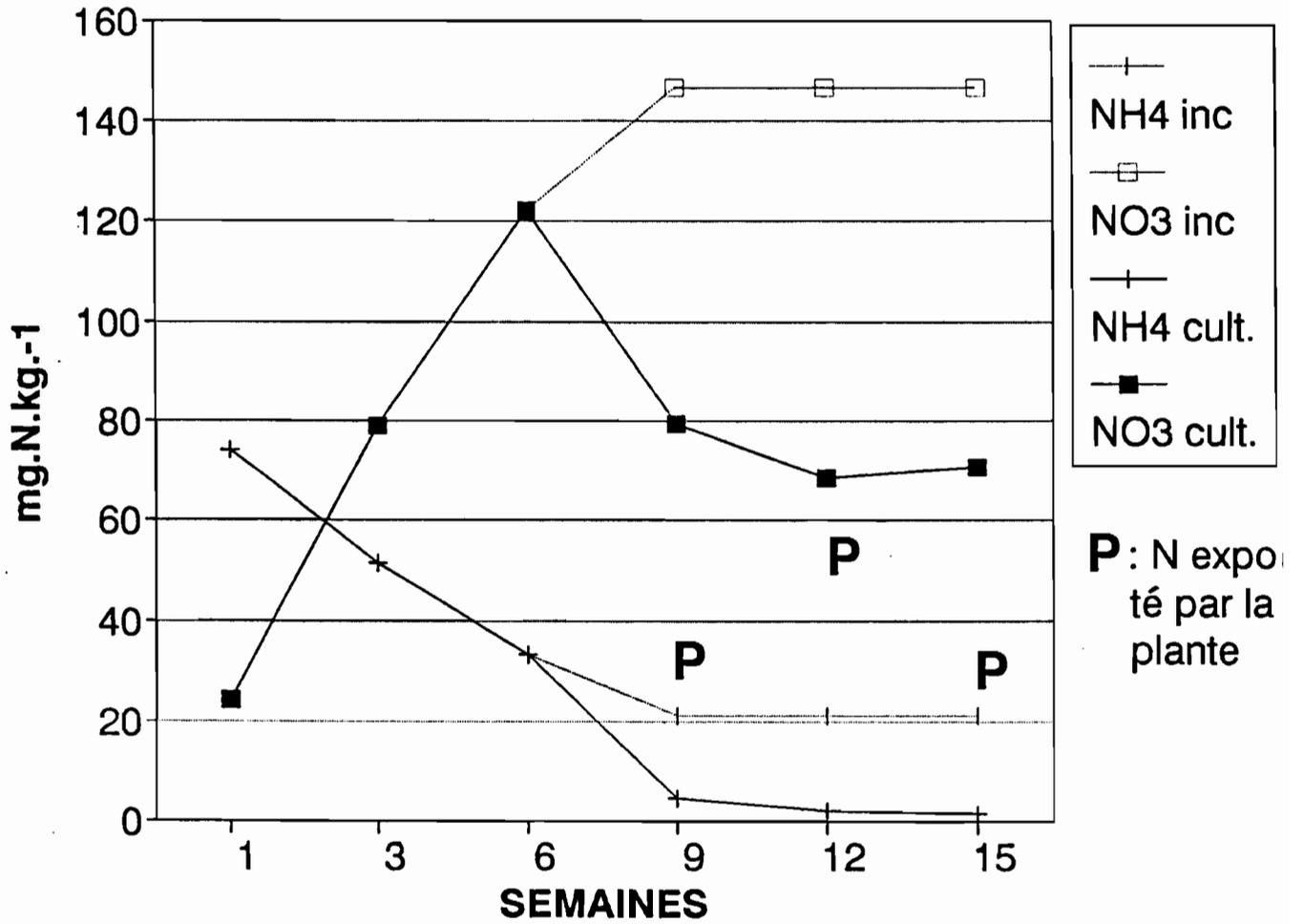
B: avec préincubation

Coupe 1.	567	4.91	28	0.41	52.56	10
2.	3330	1.68	56	0.45	57.69	23
3.	2296	1.13	26	0.45	57.69	10
TOTAL P.A.	6193		110	0.44	56.39	43
Racines c.3	1165	1.18	14	0.34	43.59	4
TOTAL	7358		123			47
N MINERAL			72	0.62	79.49	40
N BIO			64	0.10	12.82	6
N sol final			520	0.03	3.85	14
Bilan N et 15N en %			102			107

## EVOLUTION DE L'AZOTE MINERAL durant l'incubation et la 1ère culture



## EVOLUTION DE L'AZOTE MINERAL durant l'incubation et la 2ème culture



Digitaria ou du maïs qui extrait environ  $1 \text{ kg.N.ha}^{-1}.\text{j}^{-1}$ , peut être considérée comme une estimation assez raisonnable si l'on tient compte du fait qu'au champ les racines n'exploitent pas autant le sol que dans une culture en pot.

De telles valeurs peuvent constituer des repères utiles en modélisation pour guider l'établissement des limites de stress en combinaison avec les valeurs de concentration dans les tissus aériens de la plante. Elles sont en outre relativement peu coûteuses et faciles à obtenir.

### 3.4.3. Provenance de l'azote extrait

De l'azote extrait par la première culture, plus de 70% vient du fertilisant qui vient d'être ajouté dans les trois premières coupes. Par contre, le NDF tombe à 56% dans la quatrième coupe. Cette valeur de NDF se retrouve dans toutes les coupes de la deuxième culture quand six semaines de pré-incubation permettent à la biomasse microbienne d'utiliser l'ammonium issu de l'urée pour l'organisation et la nitrification.

L'interprétation que nous pouvons donner à ces deux observations est que, dans les deux cas, un nouvel ensemble d'azote organique s'est formé sous l'influence de la biomasse à partir de l'azote dérivé du sol et du fertilisant. La minéralisation de ce nouvel ensemble assure ensuite la nutrition azotée de la plante. Si les choses se passent réellement ainsi, on voit difficilement comment on pourrait simuler correctement le cycle de l'azote au cours d'une culture fertilisée, sans tenir compte de ce mode de fonctionnement. Pour cela, on devra tenir compte de la taille de cet ensemble, et de la vitesse de sa constitution et de sa minéralisation.

En ce qui concerne la taille, on peut en avoir une idée par un petit calcul de dilution isotopique. Si l'excès est égal à la moitié de celui du fertilisant introduit cet ensemble comprend autant d'azote dérivé du sol que de l'engrais. Il est donc de l'ordre de  $160 \text{ mg.N.kg}^{-1}$  en faisant une hypothèse de pertes nulles et en y incluant tout l'azote du fertilisant restant dans le sol après la troisième coupe. Ensuite à peine 5% de cet ensemble est absorbé par la plante entre la troisième et la dernière coupe soit environ  $1 \text{ mg.N.kg}^{-1}$  par semaine.

La situation se complique dans le cas de la seconde culture du fait de la présence d'une grande quantité de nitrates issue de la pré-incubation. Ces nitrates sont présents dès le semis et leur concentration et leur excès isotopique se maintient à peu près constant durant toute la durée de la seconde culture.

Non seulement cet excès est constant, mais il est supérieur à l'excès de l'azote mesuré dans les parties aériennes. Tout se passe donc comme si ces nitrates ne participaient pas à la nutrition du Ray-Grass. Ce résultat inattendu mériterait d'être d'abord confirmé par une autre expérience. Mais il a au moins le mérite d'attirer notre attention sur le fait qu'il n'est pas possible d'admettre que les plantes absorbent indifféremment les nitrates et l'ammonium, ce que font les trois modèles que nous avons examinés dans le cadre du présent travail. Il resterait également à voir quel serait le comportement du maïs dans les mêmes circonstances.

Enfin, en ce qui concerne les racines qui contiennent 25 % de l'azote absorbé dans le cas de la première culture et 14 % dans le cas de la seconde, on doit noter qu'elles ne constituent pas un meilleur indicateur de la composition de la solution du sol. En effet la majeure partie de l'azote qu'elles contiennent dérive du sol et non du fertilisant à l'inverse de la solution du sol dont la majeure partie dérive de l'urée et ceci durant toute la durée de la culture.

#### IV. DISCUSSION

Cet ensemble de résultats doit contribuer à l'élaboration de propositions concrètes en ce qui concerne la modélisation du cycle de l'azote des cultures tropicales.

Avant d'arriver à énoncer ces éléments en conclusion sous forme de proposition nous devons évaluer et ordonner les informations obtenues. Cette évaluation ne prétend pas s'appuyer comme il est habituel sur une révision bibliographique qui devra se faire à l'occasion des publications issues des résultats mentionnés ici. En effet la littérature est surabondante dans le domaine de l'azote des sols et de la nutrition azotée de plantes et une telle révision serait extrêmement fastidieuse et nous ferait sortir du cadre de ce rapport. Le simple travail d'analyse des modèles auxquels nous nous sommes livrés au cours de ces trois années suffit pour se rendre compte qu'à partir des analyses classiques d'azote minéral, "disponible" ou "assimilable" (JENKINSON 1968, GIROUX et SEN TRAN 1987) on ne peut pas répondre aux questions que pose la simulation du cycle de l'azote. En effet ces analyses reposent toutes peu ou prou sur la notion de "réserve" alors que le modèle travaille avec des flux. A lui seul, le travail pourtant considérable effectué sur la biomasse microbienne et les flux d'azote qui la traversent (CHAUSSOD et al. 1986) ne saurait suffire car il est presque toujours réalisé en l'absence de plante. De plus, cette littérature n'est pratiquement jamais orientée vers l'adaptation des modèles à l'usage en milieu tropical.

## La lysimétrie

En ce qui concerne la lysimétrie, nous avons travaillé en fonction des recommandations de Eric ROOSE spécialiste international en cette matière. Faute de place et de moyens nous n'avons pas pu installer 4 sinon 3 répétition par traitement. Il resterait également à adapter un dispositif de succion pour créer périodiquement une dépression afin d'éviter la stagnation de l'eau à la base du lysimètre et de remplacer le potentiel matriciel qui normalement attire l'eau vers les couches profondes du sol. L'observation du cylindre de sol sorti après quatre ans de fonctionnement ne nous a pas indiqué la présence de phénomènes d'oxydoréduction.

Mais le fait de s'appuyer sur cinq années de mesures nous permet de penser que les ordres de grandeur obtenus sont tout de même valables tant au niveau des quantités d'eau percolées que de leurs concentrations en azote minéral. On pourra donc en tenir compte pour la modélisation. Enfin, il faut signaler qu'il n'existe à peu près aucune série de mesures de ce type en Amérique latine tropicale sur ce type de sol. Malgré toutes leurs imperfections, ces données sont irremplaçables.

Nous pouvons enfin signaler ici un résultat non publié et qui confirme la validité de nos mesures et qui est important pour la modélisation. Il a été obtenu à partir des mesures effectuées sur les lysimètres démontés après quatre ans de fonctionnement. Le profil d'azote quinze restant de l'apport d'engrais de la première année ne montrait aucun symptôme de lessivage. En présence de végétation et d'une fertilisation azotée raisonnable, les risques de lessivage des nitrates semblent donc tout à fait mineurs dans les deux systèmes étudiés ici.

## Les prélèvements d'azote minéral au champ

Les prélèvements d'azote minéral pendant une saison de culture donnent, comme presque toujours des résultats décevants à cause de la variabilité spatiale et de la vitesse d'apparition et de disparition de l'ammonium et des nitrates. Le rapport entre la qualité de l'information et l'effort nécessaire pour l'obtenir confirme la validité d'une des options initiales du présent projet qui consistait à dire qu'il faut mieux éviter d'avoir à utiliser les valeurs d'azote minéral pour calibrer et valider les modèles.

Nous avons pensé nous appuyer sur les travaux de SARAGONI et POSS (1990) pour traiter au mieux tous les aspects touchant à l'azote minéral. Mais le sol de Barre sur lequel ils ont travaillé au Togo a une texture qui permet le prélèvement de

quantités suffisantes de solution pour pouvoir y faire les analyses nécessaires. Ce n'a pas été le cas à Barinas où même avec un bougie poreuse de gros diamètre nous n'avons jamais pu sortir plus de 5 ml de solution avec une dépression de 750 hPa. Par contre nous avons pu constater que nos résultats sont parfaitement compatibles avec ceux du Togo compte tenu de la différence de texture des deux sols. Pour des concentrations de nitrates variant entre 20 et 40 mg.N.kg<sup>-1</sup> ils évaluent les pertes par lixiviation entre 40 et 90 kg.N.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. soit environ le double des nôtres. Mais le principal est de voir se confirmer l'idée principale qui est que les pertes par lixiviation en milieu tropical sont presque dix fois moindres qu'en climat tempéré. Du fait de l'inter-saison froide, humide et sans végétation ces pertes seront forcément plus abondantes que celles d'un système à intersaison sèche avec une végétation abondante d'adventices.

#### **Le dosage de l'ammonium dans l'eau ou le KCl**

Il y a plus d'inconvénients que d'avantages à utiliser le KCl au lieu de l'eau. Les résultats du Togo que nous venons d'évoquer sont directement utilisables en modélisation y compris pour les éléments minéraux autres que l'azote. C'est là un avantage incontestable en cette période de développement de la modélisation. Dans le cas où les bougies poreuses à dépression seraient inopérantes comme à Barinas il resterait la solution du tensionic, bougie poreuse sans dépression travaillant par équilibre ionique pour l'azote (MOUTONNET et al 1993) ou l'extraction par l'eau qui elle offre plus d'avantage que d'inconvénients comme nous avons pu le voir en suivant la nitrification ou cours des incubations réalisées. De plus, si l'on veut utiliser un coefficient de partage entre les formes libres et les formes fixées de l'ammonium nous avons vu qu'il vaut mieux chercher un réactif plus énergique que le KCl pour définir les formes fixées. En effet l'ammonium échangeable dans le complexe d'échange cationique est en équilibre direct et réversible avec l'ammonium libre en solution.

#### **La comparaison des incubations et des cultures de plante test**

Pour les modélisateurs, la tentation est grande de faire appel à des résultats d'incubations de sol qui sont des expériences rapides et peu compliquées à organiser. Il est vrai que les populations microbiennes d'un échantillon de 30 g de sol sont probablement représentatives de celle de l'horizon, mais les conditions d'incubation standard sont trop différentes de la réalité du champ non seulement du fait de la constance de l'humidité et de la température élevée de l'incubateur mais surtout du fait de l'absence de plante.

Par sa présence, la plante favorise l'organisation du fait de l'injection de carbone du à la rhizodéposition. La culture de ray-grass en serre que nous avons effectué est trop courte pour le mettre clairement en évidence à cause de l'imprécision des résultats d'azote total et d'azote quinze. Cependant, comme il n'y a pratiquement pas de pertes, on voit qu'en fin de première culture il n'y a plus d'azote minéral mais le sol contient plus d'azote dérivé du fertilisant qu'en fin de deuxième culture où il y a encore beaucoup de nitrates et moins d'azote dérivé du fertilisant dans le sol. Cet indice serait insuffisant si nous ne disposions pas des résultats de Barinas qui nous ont prouvé que la rhizodéposition abondante de la prairie permanente organise deux fois plus d'azote dérivé du fertilisant que ne peut le faire une culture de maïs.

Le fait que la présence de la plante la plante empêche l'accumulation des nitrates, provient soit de leur absorption soit de l'absorption immédiate dans la rhizosphère de l'ammonium issu de la minéralisation. Cet ammonium serait ainsi soustrait au processus de nitrification. La disparition accélérée de l'ammonium et la permanence des nitrates constatée dans la deuxième culture nous fait pencher en faveur de la deuxième hypothèse mais on ne saurait conclure à partir d'une seule expérience.

Dans les deux cultures, nous constatons que l'incubation ne saurait être considérée comme une expérience utile pour calibrer les modèles. Les processus sont déviés quantitativement et qualitativement par la présence de la plante. Cette déviation est encore plus sensible dans le cas des sols dépourvus de réserves organiques dans lesquels l'injection de carbone par la rhizodéposition joue un rôle décisif dans l'orientation des processus et les équilibres entre minéralisation et organisation brutes. Il est fort possible que dans le cas de beaucoup de sols tempérés, dotés de réserves organiques abondantes, une incubation à 28°C simule assez bien ce qui se passe au printemps quand les sols se réchauffent et que les plantes ne se sont pas encore développées. Mais sous climat tropical constamment chaud et humide, la présence de la plante dans l'expérience de calibration du modèle est d'une importance cruciale et une bonne simulation du cycle de l'azote ne saurait s'appuyer sur des expériences sans plantes.

En effet, si on part d'une surestimation de la production de nitrates à partir des résultats d'une incubation, la simulation va surestimer le transfert de ces nitrates vers les couches profondes du sol du fait des pluies abondantes qui caractérisent la saison de culture en climat tropical chaud. Cette lixiviation supposée va déclencher à son tour un stress d'azote qui n'a rien à voir avec la réalité. La simulation de la lixiviation devrait prendre également en compte, quand elle existe, l'absorption préférentielle de l'ammonium de la part de la plante. Ce qui est

évoqué actuellement dans les modèles est seulement la compétition de la biomasse microbienne pour l'organisation de l'ammonium par rapport à la nitrification.

Enfin ce que prennent en compte les modèles est une fixation plus ou moins réversible de l'ammonium par le complexe d'échange. Nous avons vu que ce coefficient de partage de l'ammonium dépend de la concentration, et certainement du type d'argile et devrait donc faire l'objet d'un calibrage spécial en présence de plante au moins pour les principaux types de sol tropicaux. Il n'est pas possible que ce coefficient de partage soit admis arbitrairement une fois pour toute et encore moins à partir d'expériences effectuées en climat tempéré et en l'absence de plante.

L'incubation n'est pas le meilleur moyen de calibrer les modèles. Il vaudrait mieux utiliser les cultures en serre qui réunissent presque tous les avantages de l'incubation et éliminent ses principaux inconvénients.

Resterait à discuter le choix de la plante test. Le principal avantage d'une graminée comme le ray-grass est qu'il supporte de coupes répétées et par là donne une idée de la cinétique des phénomènes. En outre nous avons établi dans le présent travail que pour une quantité de sol minimale, les quantités de matière sèche produites et d'azote extrait du sol fertilisé et les vitesses d'extraction permettent des extrapolations qui ne sont pas dépourvues de sens par rapport aux résultats du champ. Mais ce n'est pas suffisant pour définir la méthode. En effet, il est fort possible que certaines plantes manifestent une préférence pour l'ammonium et d'autre non. Il resterait à refaire l'expérience de la culture avec pré-incubation en comparant le maïs et le ray-grass. Ce type de comparaison serait indispensable avant de fixer le choix d'une plante test à utiliser pour calibrer en serre les paramètres qu'il est impossible de calibrer au champ à cause de l'imprécision des mesures.

En effet c'est à cause de cette imprécision que les modélisateurs en sont réduits à déclencher la simulation des stress à partir de concentrations d'azote que l'on suppose critiques pour la plante. Les exemples que nous donnons dans l'annexe consacrée aux analyses de sensibilité montrent que le problème de la simulation des stress est probablement celui qui est le plus mal traité dans les modèles actuels. Il serait probablement plus judicieux de déclencher le stress azote à partir du moment où on arriverait au flux d'azote minimum du sol considéré, ce seuil étant déterminé par une expérience préliminaire: par exemple une culture de plante test. Dans le cas du sol de Barinas nous avons de bonnes raisons de penser que ce flux minimum est de l'ordre de 0,4 kg.N.ha-1.j-1 une fois organisé le fertilisant. La connaissance

d'une telle valeur est utile pour optimiser la date d'apport de l'engrais azoté et affiner ainsi la qualité des simulations.

#### Provenance de l'azote extrait.

Cet aspect essentiel est peu pris en compte par les modèles. Seul NCSWAP offre une option 15N qui prétend surtout décrire l'organisation de l'azote dérivé du fertilisant dans les divers pools labiles et résistants qu'il propose de distinguer. Avant d'en arriver à ce degré de détail dans le sol, il faut d'abord régler le problème essentiel de l'utilisation de l'engrais par la plante dont on prétend simuler la croissance.

A ce point de vue, les résultats ne manquent pas à cause des innombrables cultures marquées effectuées avec l'azote quinze, tout au moins celles qui comportent des prélèvements intermédiaires avant la récolte finale. Ces résultats ont été confirmés et précisés dans le cas du sol ferrugineux tropical de Barinas grâce aux cultures marquées effectuées en 86, 87, et 88. Ils sont assez cohérents avec ceux de l'expérience de culture de ray-grass dans le sens que en début de culture l'azote absorbé par le maïs provient à 70% du sol et à 30 % seulement du sol. Par la suite, la participation de l'engrais diminue d'une manière qui dépend du type de sol et de plante pour arriver à une participation globale de l'azote de l'engrais variant entre 30 et 50 % de l'azote total absorbé. Dans le cas du maïs cultivé à Barinas, cette participation de l'engrais suit une dynamique un peu particulière car tout l'engrais est absorbé durant les 60 premiers jours et tout l'azote absorbé par la suite vient du sol. Il est difficile de dire si cette dynamique correspond au fait que l'apport d'urée était localisé en bande ce qui fait que après les deux premiers mois les racines explorent les parties non marquées du sol ou bien si l'azote dérivé du fertilisant est organisé d'une manière non réversible tout au moins à l'échelle de temps de la culture.\*

- 
1. \*C'est une des raisons pour laquelle il nous semble indispensable de répartir uniformément l'engrais en surface lors des expériences de calibration et de validation des modèles. En effet, tous les modèles font migrer les couches d'eau avec leur contenu d'azote minéral mais, selon ce que nous avons pu voir, aucun d'entre eux ne prend en compte les gradients de concentration qui résultent inévitablement d'un apport localisé et de la diffusion progressive de l'engrais dans le sol. Nous avons également effectué à deux reprises des comparaisons d'apport en bande et en surface. L'apport en bande favorise indéniablement la production de matière sèche mais pas significativement celle de grains. L'autre raison est que un apport uniforme en surface permettra de faire des mesures d'évolution de l'azote de la solution du sol beaucoup plus fiables qu'un apport localisé.

Face à ces avantages décisifs, l'argument qui consiste à dire que la pratique agricole courante consiste à apporter l'urée en bande latérale au semis nous paraît de peu de poids au moment de calibrer et de valider un modèle simulant le cycle de l'azote dans les cultures tropicales.

## CONCLUSIONS

On ne voit pas comment un effort d'amélioration de la modélisation du cycle de l'azote dans des systèmes sol plante pourrait être mené à bien sans préciser le rôle de la solution du sol. Les modélisateurs ont, avec raison, donné un rôle moteur aux mouvements de la solution dans le sol et cela et cela paraît indispensable. Mais ce rôle central n'implique pas forcément que les mesures instantanées à réaliser pour la calibration soient précises dans ce compartiment qui pourrait rester virtuel dans le système. On sait que cette précision sera toujours illusoire compte tenu de la variabilité spatiale et temporelle de l'azote dans ce compartiment. Par contre, il est sûr que utiliser la solution du sol en modélisation implique des évaluations réalistes des flux d'entrée et de sortie qui peuvent en partie reposer sur des mesures faites en amont dans les compartiment organiques et en aval dans la plante.

Le travail expérimental mené à propos de la solution du sol nous a confirmé que les mesures instantanées d'azote minéral au champ ne sont guère utiles car elles ne reflètent que très mal la capacité du sol à alimenter les cultures en azote. Par contre des mesures de bilans comme celles que l'on peut faire en serre, ou au champ en continu par lysimétrie ou à l'aide des bougies poreuses sont beaucoup mieux adaptées aux besoins des modélisateurs. Elles comportent un minimum de distorsion par rapport à l'action habituelle de l'eau de pluie sur le sol cultivé et la répétition des mesures efface en partie les inconvénients de la variabilité spatiale et temporelle.

Les incubations devraient être avantageusement remplacées par des cultures en serre de plantes test réalisées avec des engrais marqués. Ces expériences préliminaires permettront de préparer beaucoup mieux les inévitables expériences de terrain qui termineront la calibration du modèle étudié. Elles devront comporter une étude comparative permettant de tenir compte de l'éventuelle préférence, pour les nitrates ou l'ammonium, des plantes dont on veut simuler la croissance. L'azote absorbé par la plante pendant une période donnée ne reflète pas nécessairement la composition de la solution du sol présente au terme de cette période. Cette similitude n'existe au mieux que pendant les premières semaines qui suivent la fertilisation.

La priorité doit être donnée à l'étude de l'ensemble organique azoté qui résulte de l'organisation de l'azote dérivé de l'engrais et du sol pendant cette période critique qui suit la fertilisation. La formation et le comportement de cet ensemble constituent les données indispensables à une simulation du cycle de l'azote car c'est lui qui en fait alimente la solution du sol grâce à l'activité de la biomasse microbienne.

Mais il s'agit d'un ensemble plus vaste que la biomasse et il serait souhaitable de pouvoir y faire des mesures plus faciles à réaliser que celles des flux traversant la biomasse. C'est le sens des tentatives évoquées dans l'annexe consacrée aux fractions organiques.

Pour pouvoir continuer à donner un rôle central à la solution du sol dans la simulation du cycle de l'azote dans les cultures tropicales, il faut d'abord bien connaître les modèles que l'on prétend adapter à la fois dans leur ensemble et dans leur moindres détails. Il faut ensuite donner priorité aux suivis des évolutions de la solution au cours des cultures par rapport aux mesures isolées. Il faut enfin préférer les cultures de plante tests aux incubations qui peuvent facilement donner des informations erronées sur l'orientation et l'intensité des processus assurant l'alimentation azotée des plantes cultivées.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

**INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)**

**Nom du laboratoire :**

**SOMOS ULA-ORSTOM**

**Adresse :**

**Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA**

**HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.**

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE III.**

**Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie**

**Mai 1993**

**Décision d'aide N° 89 L 0531**

### ANNEXE III : COMPARTIMENTATION DE L'AZOTE ORGANIQUE

Cette annexe provisoire en espagnol n'a pas été traduite car elle est seulement constituée par les résultats de laboratoire concernant les hydrolyses d'azote protéique et les extractions sélectives d'azote dispersable et d'azote oxydable qui ont été testées par Marilena ZUVIA.

Une fois interprétés, ces résultats seront publiés en français dans le cadre de la thèse de Doctorat en préparation que M.ZUVIA doit soutenir à la Faculté des Sciences d'ORSAY. Cette thèse viendra alors se substituer à l'annexe III.

Rappelons que l'expérience de base consiste en un culture de maïs de 70 jours effectuée en serre dans des pots de culture de deux kilos de sol humide récemment échantillonné à partir de l'horizon de surface du sol de Barinas.

Les graphiques présentés illustrent les résultats présentés dans le texte principal.

Le premier correspond à la variation de l'azote protéique au terme de la première culture effectuée tant sur le sol prélevé sous prairie (p et P non fertilisé PF, fertilisé) que sous maïs (m et M non fertilisé MF, fertilisé). Le semis a été effectué une semaine après la fertilisation de manière à donner à l'urée le temps d'être hydrolysée en ammonium impliqué à son tour dans les processus d'organisation et de nitrification.

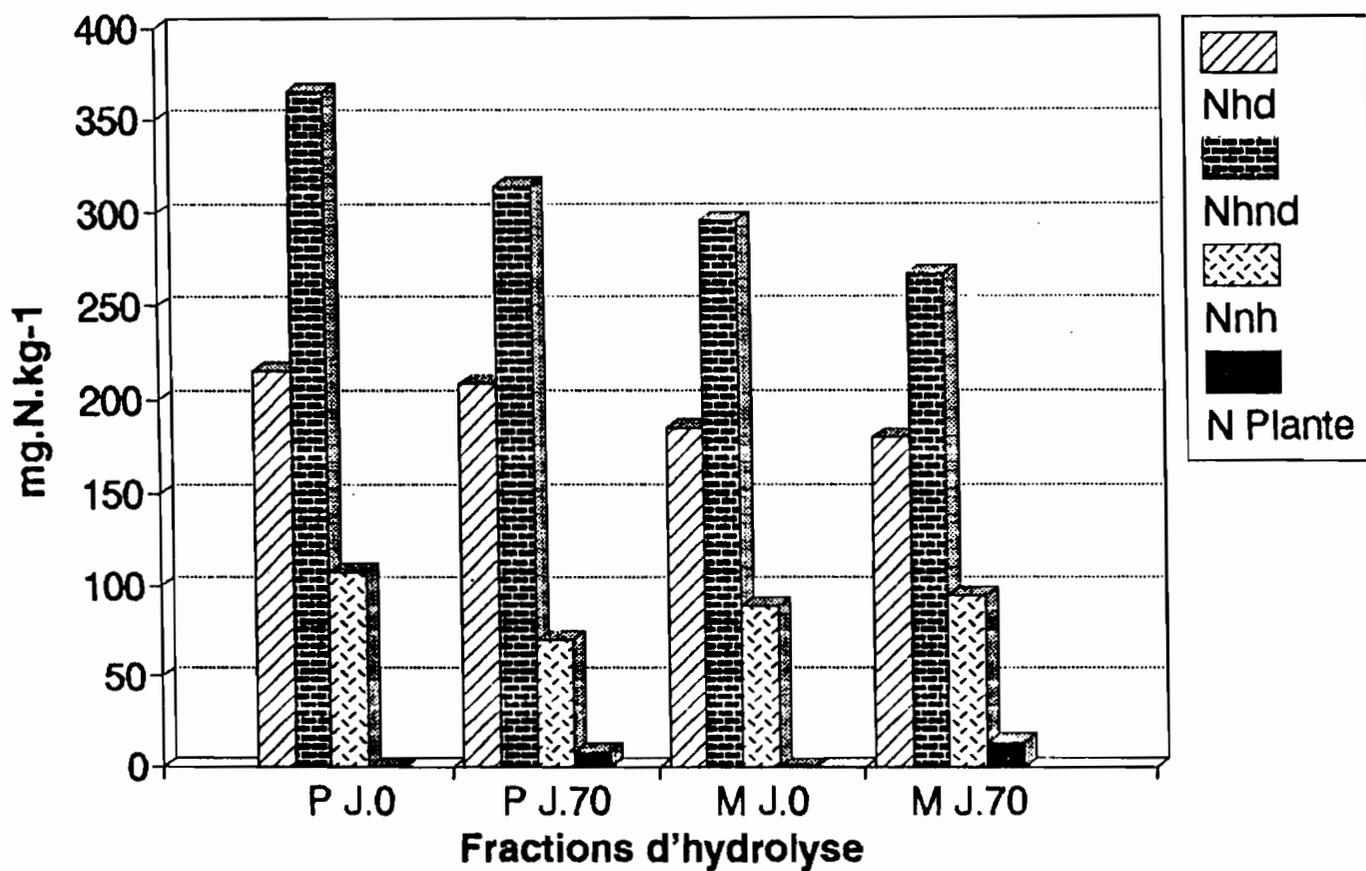
Le second illustre le changement de comportement de l'azote protéique après les deux cultures effectuées avec le sol prélevé soit en avril soit en septembre. Ces résultats contradictoires sont ceux qui nous ont amené à abandonner la méthode.

Le graphique suivant montre comment les extractions d'azote organique par le bicarbonate de sodium et le permanganate de potassium révèlent les changements provoqués par la culture de maïs. A titre de comparaison, nous y avons fait figurer également les exportations d'azote par le maïs.

Par contre n'y figurent pas les résultats d'azote quinze qui nous ont montré que l'azote dosé dans le bicarbonate se marque rapidement à partir de l'azote uréique mais n'est presque plus marqué en fin de culture. Par contre l'azote oxydable par le permanganate n'est significativement marqué ni au début ni à la fin de la culture

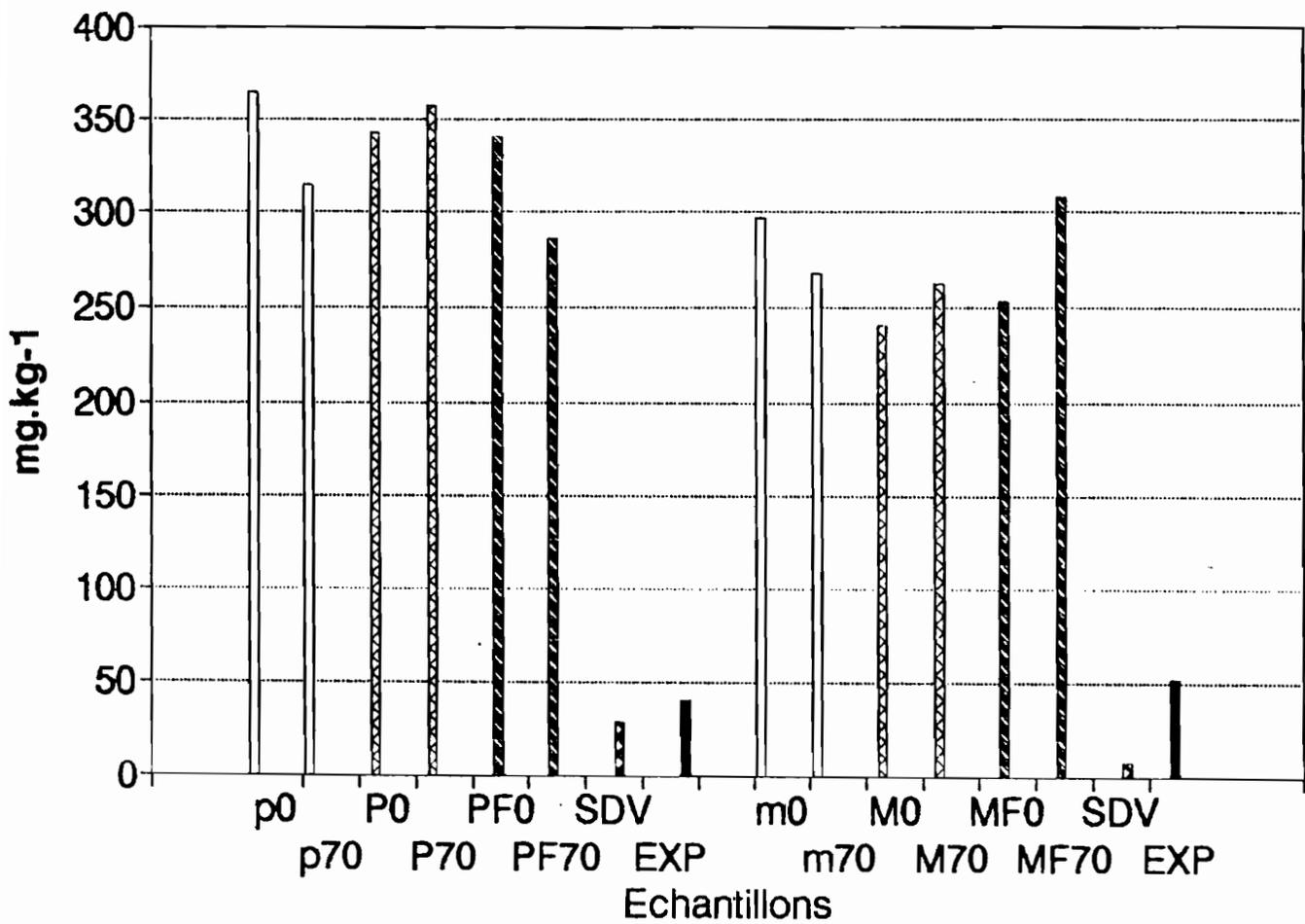
# AZOTE PROTEIQUE: EFFET DE LA CULTUR

Sol prélevé en Avril



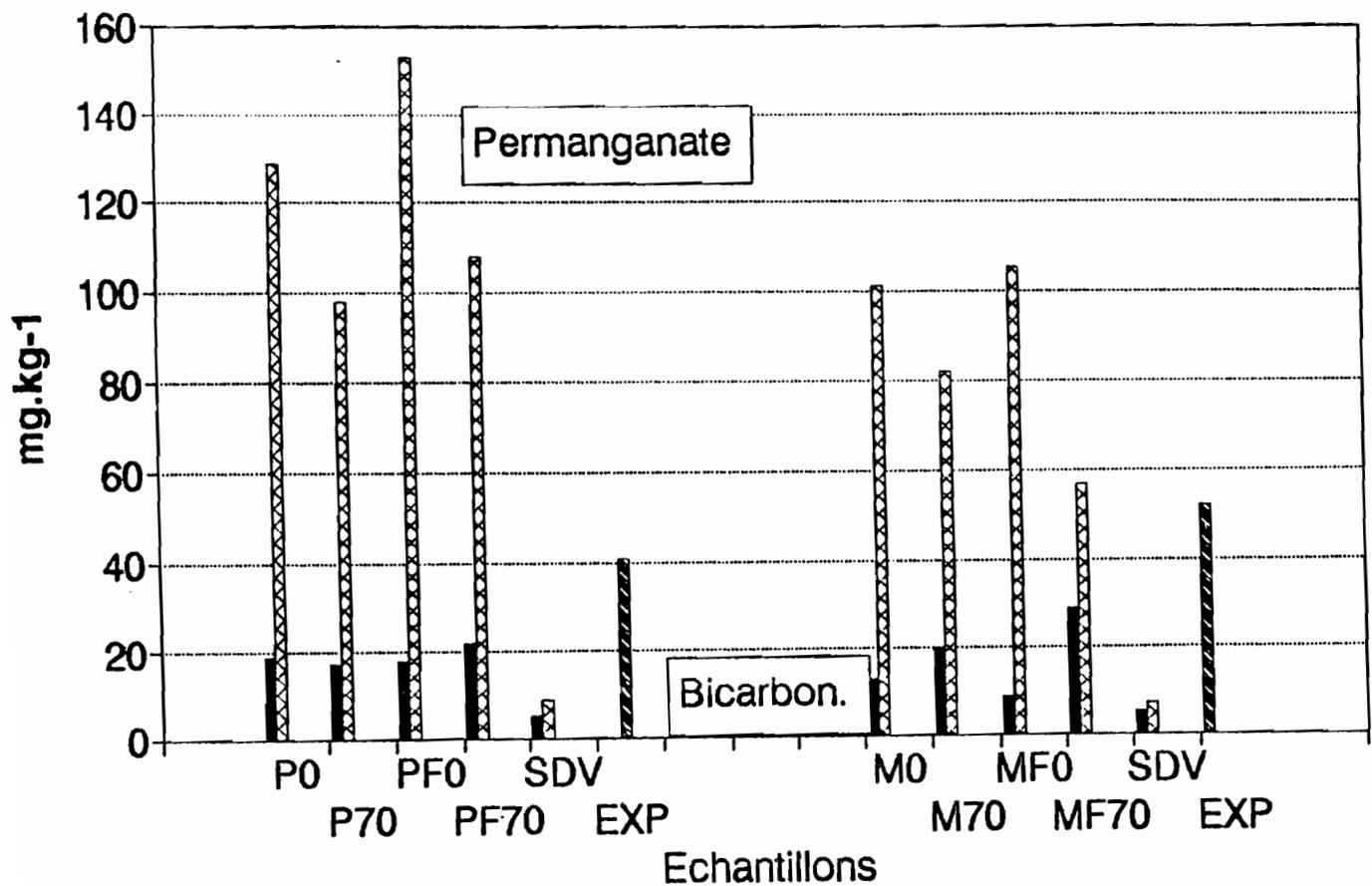
# AZOTE PROTEIQUE

## Avant et apres les cultures



# AZOTE DISPERSABLE ET OXYDABLE

## Avant et apres les cultures



U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

UELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

1 A

ULTIVO	G	I	K	M
	DESNUDO SF	DESNUDO SF	DESNUDO CF	DESNUDO SF
UELO	PD	PD	PD	MU
ORIZONTE MUESTREADO	0-20	0-20	0-20	0-20
ECHA DE MUESTREO DEL SUELO	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	ENE 1991
HUMEDAD DEL SUELO MUESTREADO	4.00 (0.41)	12.60 (0.33)	12.60 (0.33)	3.67 (0.24)
T DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	660 (3)	641 (17)	641 (17)	532 (8)
-NO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	3.75 (0.42)	?	?	6.64 (0.42)
-NH4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	8.33 (0.42)	?	?	7.47 (0.83)
-MIN DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	12.08	?	?	14.11
pH DEL SUELO MUESTREADO	4.85 (0.04)	5.10 (0.1)	5.10 (0.1)	4.93 (0.12)
-NaHCO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *a	?	19.44 (0.54)	19.44 (0.54)	?
-KMnO4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *b	?	128 (5)	128 (5)	?
ECHA DE FERTILIZACION	27/02/91 PK	23/09/91 PK	23/09/91 MPK	27/02/91 PK
ECHA DE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA
ECHA DE INICIO	20/02/91	30/09/91	30/09/91	20/02/91
ECHA DE LA COSECHA (DURACION EN DIAS)	30/04/91 (70)	09/12/91 (70)	09/12/91 (70)	30/04/91 (70)
PESO DEL SUELO HUMEDO AÑADIDO AL POTE (KG)	1.00	2.00	2.00	1.00
DE HUMEDAD DEL SUELO AÑADIDO AL POTE	4.00	12.60	12.60	3.67
FORMA DE ADICION DEL FERTILIZANTE	50 ML/APLIC/15 D 4 APLICACIONES	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	50 ML/APLIC/15 D 4 APLICACIONES
IT DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO (mg/ml)			??2.11	
DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO			27.69	
-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)			60.35	
15N-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)			16.71	
-FER AÑADIDO (KG/HA) (1 HA = 3000 KG 0-20 CM)			181	
-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	8.33 POR APLIC	38.14	38.14	8.30 POR APLIC
-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	100	114	114	100
2-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	8.33 POR APLIC	38.14	38.14	8.30 POR APLIC
2-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	100	114	114	100
Ca-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)				
FORMA DE MUESTREO DEL SUELO PARA LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# MUESTRAS MEZCLADAS)				
POR POTE (# DE POTES)	3	5	5	3
REPETICIONES EN LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# DE REPETICIONES)				
POR POTE (# DE REPETICIONES)	1	1	1	1
% HUMEDAD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	?	14.68	14.92	?
pH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	4.85	4.16	4.64	4.93
NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	660 (3)	641 (17)	700 (16)	532 (8)
15NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			17.00 (0.82)	
%E DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			2.59 (0.08)	

## C U A D R O   C O M P A R A T I V O   D E   L O S   C U L T I V O S   E N   P O T

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

2 A

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	G	I	K	M
	DESNUDO SF PD 0-20 EME 1991	DESNUDO SF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO SF MU 0-20 EME 1991
N-N03 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	1.80 (0.72)	4.13 (0.58)	?
15N-N03 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.81 según MUCF calculado	
15N-N03 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			70.86 ?	
15N-N03 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			4.85 ?	
%E N-N03 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO				
N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	3.83 (0.68)	55.03 (1.10)	?
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			14.38 (0.50)	
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			94.37	
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			86.05	
%E N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			26.14 (0.81)	
N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	5.63	59.16	
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			15.29 ?	
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			93.34 ?	
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			91.50 ?	
%E N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (CALCULADO)			24.31	
N-BIO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	42.19 (7.05)	?	?	34.26 (5.1)
N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	19.45 (0.54)	18.43 (0.98)	?
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			1.89 ?	
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			37.03 ?	
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			11.31 ?	
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			22.05 (0.21)	
N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	129 (5)	153 (9)	?
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.86 (0.46)	
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			2.03	
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			5.15	
%E N-KMnO4 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			7.32 (0.26)	
NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	215 (3)	210 (17)	239 (16)	185 (5)
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			15.77 (0.91)	
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			23.83	
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			94.37	
%E NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			6.40 (0.07)	
NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	366 (13)	323 (7)	341 (11)	296 (3)
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.72 (0.42)	
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			0.76	
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			4.31	
%E NHT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			2.65 (0.06)	
NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	109 (1)	108 (15)	119 (8)	89 (2)
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.66 (0.12)	
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			2.00	
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			3.95	
%E NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			0.55 (0.10)	

CUADRO COMPARATIVO DE LOS CULTIVOS EN POTE

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UMELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO) 3 A

CULTIVO	G	I	K	M
	DESNUDO SF PD 0-20 ENE 1991	DESNUDO SF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO SF MU 0-20 ENE 1991
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA NT	104	105	106	107
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA 1SNT			103	
COSECHA DIAS DESPUES DE LA SIEMBRA	70	70	70	70
ALTURA DE LA PLANTA (CM)				
PESO SECO DE LA PARTE AEREA (G/PLANTA)				
PESO SECO DE LA RAIZ (G/PLANTA)				
PES SEC PA/PES SEC RA				
FORMA DE UBICACION DE LAS RAIRES EN EL POTE				
NT PARTE AEREA (MG/PLANTA)				
NT PARTE AEREA (% RESPECTO AL PESO SECO)				
NT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT PARTE AEREA (MG/PLANTA)				
1SNT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT PARTE AEREA (% NDF)				
1SNT PARTE AEREA (% CRU)				
%E PARTE AEREA				
NT RAIZ (MG/PLANTA)				
NT RAIZ (% RESPECTO AL PESO SECO)				
NT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT RAIZ (MG/PLANTA)				
1SNT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT RAIZ (% NDF)				
1SNT RAIZ (% CRU)				
%E RAIZ				
NT PA+RA (MG/PLANTA)				
NT PA+RA (% RESPECTO AL PESO SECO)				
NT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT PA+RA (MG/PLANTA)				
1SNT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
1SNT PA+RA (% NDF)				
1SNT PA+RA (% CRU)				
%E PA+RA (CALCULADO)				
NT SUELO AL COSECHAR (PPM)	645 (14)	652 (14)	666 (8)	582 (7)
1SNT SUELO AL COSECHAR (PPM)			12.22 (0.76)	
1SNT SUELO AL COSECHAR (% NDF)			6.63	
1SNT SUELO AL COSECHAR (% CRU)			73.13	
%E SUELO AL COSECHAR			1.83 (0.11)	
%E SUELO AL SEMBRAR			2.59 (0.08)	
NT AL SEMBRAR - NT AL COSECHAR (PPM)	15	-11	34	-50
1SNT AL SEMBRAR - 1SNT AL COSECHAR (PPM)			4.78	

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

4 A

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	G	I	K	M
	DESNUDO SF PD 0-20 ENE 1991	DESNUDO SF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO SF MU 0-20 ENE 1991
BALANCE NT COSECHA				
NT PLANTA (PPM)				
NT SUELO (PPM)	645	652	666	582
% RECUPERACION (RESPECTO NT SIEMBRA)	97.73	101.72	95.14	109.40
DISTRIBUCION DEL N-FER EN LA COSECHA				
PLANTA %				
SUELO %			73.13	
PERDIDAS %			26.87	
N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	6.96 (0.76)	8.10 (2.54)	35.78 (6.50)	12.86 (1.15)
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)			7.97 e	
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			80.44	
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			47.69	
%E N-NO3 SUELO AL COSECHAR			24.00 e	
%E N-NO3 SUELO AL SEMBRAR			?	
N-NO3 AL SEMBRAR - N-NO3 AL COSECHAR (PPM)	-3.21 COS=MUEST	-6.30	-31.65	-6.22 COS=MU
15N-NO3 AL SEMBRAR - 15N-NO3 AL COSECHAR (PPM)			-7.16	
N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	0.00	10.26 (1.09)	33.10 (1.60)	0.00
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)			6.29 e	
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			68.63	
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			37.64	
%E N-NH4 SUELO AL COSECHAR			19.08 e	
%E N-NH4 SUELO AL SEMBRAR			26.14	
N-NH4 AL SEMBRAR - N-NH4 AL COSECHAR (PPM)	8.33 COS=MUEST	-6.43	21.93	7.47 COS=MU
15N-NH4 AL SEMBRAR - 15N-NH4 AL COSECHAR (PPM)			8.09	
N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)	6.96	18.36	68.88	12.86
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)			14.26 e	
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% MDF)			74.77	
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% CRU)			85.33	
%E N-MIN SUELO AL COSECHAR			20.70	
%E N-MIN SUELO AL SEMBRAR			24.31	
N-MIN AL SEMBRAR - N-MIN AL COSECHAR (PPM)	5.12 COS=MUEST	-12.73	-9.72	1.25 COS=MU
15N-MIN AL SEMBRAR - 15N-MIN AL COSECHAR (PPM)			1.03 e	
N-BIO SUELO AL COSECHAR (PPM)	43.3 (11.8)			38.00 (12.05)
N-BIO AL SEMBRAR - N BIO AL COSECHAR (PPM)	-1.11			-3.74

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO) S A

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	G	I	K	M
	DESNUDO SF PD 0-20 ENE 1991	DESNUDO SF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO SF MU 0-20 ENE 1991
N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	40.49 (3.43)	14.8 (4.57)	4.00 (7.40)	16.32 (3.77)
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)			-5.32 ???	
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			???	
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			???	
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL COSECHAR			13.49 (2.47)	
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL SEMBRAR			22.05	
N-NaHCO3 AL SEMBRAR - N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)	?	4.65	14.43	?
15N-NaHCO3 AL SEMBRAR - 15N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)			??	
N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	132.59 (6.09)	94.96 (10.61)	95.82 (2.64)	115.86 (5.57)
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)			-1.14 ??	
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			??	
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			??	
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL COSECHAR			4.04 (0.75)	
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL SEMBRAR			7.32	
N-KMnO4 AL SEMBRAR - N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)	?	33.61	56.93	?
15N-KMnO4 AL SEMBRAR - 15N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)			??	
N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)	203 (3)	202 (7)	227 (12)	191 (3)
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)			8.11 (1.68)	
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% MDF)			12.90	
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% CRU)			48.53	
%E N-NHD SUELO AL COSECHAR			3.56 (0.62)	
%E N-NHD SUELO AL SEMBRAR			6.4	
N-NHD AL SEMBRAR - N-NHD AL COSECHAR (PPM)	12	8	12	-6
15N-NHD AL SEMBRAR - 15N-NHD AL COSECHAR (PPM)			7.66	
N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)	345 (12)	353 (21)	318 (34)	268 (19)
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)			1.62 e	
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% MDF)			1.84	
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% CRU)			9.69	
%E N-NHT SUELO AL COSECHAR			1.53 e	
%E N-NHT SUELO AL SEMBRAR			2.65	
N-NHND AL SEMBRAR - N-NHND AL COSECHAR (PPM)	21	-30	23	28
15N-NHND AL SEMBRAR - 15N-NHND AL COSECHAR (PPM)			-0.9	
N-NNH SUELO AL COSECHAR (PPM)	106 (10)	107 (11)	92 (4)	105 (6)
15N-NNH SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.41 e	
15N-NNH SUELO AL COSECHAR (% MDF)			1.61	
15N-NNH SUELO AL COSECHAR (% CRU)			2.45	
%E N-NNH SUELO AL COSECHAR			0.46 e	
%E N-NNH SUELO AL SEMBRAR			0.55	
N-NNH AL SEMBRAR - N-NNH AL COSECHAR (PPM)	3	1	27	-16
15N-NNH AL SEMBRAR - 15N-NNH AL COSECHAR (PPM)			0.25	

C U A D R O   C O M P A R A T I V O   D E   L O S   C U L T I V O S   E N   P O

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO) 6

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	G	I	K	M
	DESNUDO SF PD 0-20 ENE 1991	DESNUDO SF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF PD 0-20 SEP 1991	DESNUDO SF MU 0-20 ENE 1991
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA NT	103	101	96	101
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA 15NT			82.98	
MINERALIZACION NETA (PPM) (N MIN P70 + N PLANTA) - N MIN P0	-5.12	12.73	9.72	-1.25
INMOVILIZACION NETA DE N-FER EN EL SUELO AL COSECHAR 15N (PPM) 15NT-15N MIN %NDF			-2.04 e	

CUADRO COMPARATIVO DE LOS CULTIVOS EN POTE

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

1 B

CULTIVO	V	X	Z	AB
	DESNUDO SF MU	DESNUDO CF MU	MAIZ SF PD	MAIZ SF PD
HORIZONTE MUESTREADO	0-20	0-20	0-20	0-20
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	SEP 1991	SEP 1991	ENE 1991	SEP 1991
% HUMEDAD DEL SUELO MUESTREADO	10.70 (0.21)	10.70 (0.21)	4.00 (0.41)	12.60 (0.33)
NT DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	542 (6)	542 (6)	660 (3)	641 (17)
N-NO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	?	?	3.75 (0.42)	?
N-NH4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	?	?	8.33 (0.42)	?
N-MIN DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	?	?	12.08	?
pH DEL SUELO MUESTREADO	4.33 (0.06)	4.33 (0.06)	4.85 (0.04)	5.10 (0.1)
N-NaHCO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *a	12.96 (5.05)	12.96 (5.05)	?	19.44 (0.54)
N-KMnO4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *b	100 (8)	100 (8)	?	128 (5)
FECHA DE FERTILIZACION	23/09/91 PK	23/09/91 NPK	27/02/91 PK	23/09/91 PK
FECHA DE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA	NO SE SIEMBRA	20/02/91	30/09/91
FECHA DE INICIO	30/09/91	30/09/91	20/02/91	30/09/91
FECHA DE LA COSECHA (DURACION EN DIAS)	09/12/91 (70)	09/12/91 (70)	30/04/91 (70)	09/12/91 (70)
PESO DEL SUELO HUMEDO AÑADIDO AL POTE (KG)	2.00	2.00	2.00	2.00
% DE HUMEDAD DEL SUELO AL SEMBRAR	10.70	10.70	4.00	12.60
FORMA DE ADICION DEL FERTILIZANTE	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	100 ML/APLIC/15D 4 APLICACIONES	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA
NT DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO (mg/ml)		22.1		
% DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO		27.69		
N-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)		59.07		
15N-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)		16.36		
N-FER AÑADIDO (KG/HA) (1 HA = 3000 KG 0-20 CM)		177		
K-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	37.33	37.33	8.33 POR APLIC	38.14
K-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	112	112	100	114
P-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	37.33	37.33	8.33 POR APLIC	38.14
P-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	112	112	100	114
Ca-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)				
FORMA DE MUESTREO DEL SUELO PARA LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# MUESTRAS MEZCLADAS)				
POR POTE (# DE POTES)	5	5	3	5
REPETICIONES EN LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# DE REPETICIONES)				
POR POTE (# DE REPETICIONES)	1	1	1	1
% HUMEDAD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	12.93	12.83	?	14.68
pH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	4.02	4.42	4.85	4.16
NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	542 (6)	596 (8)	660 (3)	641 (17)
15NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		17.34 (1.33)		
% DE DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		2.87 (0.28)		

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

2 B

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	V	X	Z	AB
	DESNUDO SF MU 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF MU 0-20 SEP 1991	MAIZ SF PD 0-20 ENE 1991	MAIZ SF PD 0-20 SEP 1991
N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	6.57 (0.46)	13.15 (0.23)	?	1.80 (0.72)
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		2.58 (0.07)		
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		70.86		
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		15.77		
%E N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		19.42 (0.65)		
N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	2.53 (0.72)	43.92 (2.33)	?	3.83 (0.68)
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		12.55 (0.69)		
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		103.19		
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		76.73		
%E N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		28.6 (1.21)		
N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	9.10	57.07		5.63
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		15.13		
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		95.74		
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		92.50		
%E N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (CALCULADO)		26.51		
N-BIO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			42.19 (7.05)	
N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	12.95 (5.05)	8.75 (3.20)	?	19.45 (0.54)
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		1.01 (1.02)		
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		41.69		
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		6.17		
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		24.09 (0.40)		
N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	101 (8)	105 (7)	?	129 (5)
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		0.25 (1.24)		
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		0.86		
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		1.53		
%E N-KMnO4 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		8.14 (0.90)		
NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	192 (5)	232 (4)	215 (3)	210 (17)
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		11.41 (1.35)		
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		17.76		
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		69.76		
%E NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		4.75 (0.67)		
NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	240 (6)	253 (8)	366 (13)	323 (7)
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		2.39 (1.02)		
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		3.41		
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		14.61		
%E NHT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		2.70 (0.26)		
NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	110 (8)	111 (6)	109 (1)	108 (15)
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		0.38 (0.09)		
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)		1.24		
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)		2.32		
%E NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO		0.34 (0.07)		

CUADRO COMPARATIVO DE LOS CULTIVOS EN POTE

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UMELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA

3 B

MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

	V	X	Z	AB
CULTIVO	DESNUDO SF	DESNUDO CF	MAIZ SF	MAIZ SF
SUELO	MU	MU	PD	PD
HORIZONTE MUESTREADO	0-20	0-20	0-20	0-20
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	SEP 1991	SEP 1991	ENE 1991	SEP 1991
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA NT	107	105	104	105
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA 15NT		85		
COSECHA DIAS DESPUES DE LA SIEMBRA	70	70	70	70
ALTURA DE LA PLANTA (CM)			?	?
PESO SECO DE LA PARTE AEREA (G/PLANTA)			1.92 (0.30)	1.04 (0.08)
PESO SECO DE LA RAIZ (G/PLANTA)			1.61 (0.11)	1.10 (0.08)
PES SEC PA/PES SEC RA			1.19	0.95
FORMA DE UBICACION DE LAS RAIRES EN EL POTE			?50% FUERA SUELO	?40% FUERA SUELO
NT PARTE AEREA (MG/PLANTA)			8.49 (0.94)	5.44 (0.88)
NT PARTE AEREA (% RESPECTO AL PESO SECO)			0.44	0.52
NT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)			4.42	3.11
15NT PARTE AEREA (MG/PLANTA)				
15NT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
15NT PARTE AEREA (% NDF)				
15NT PARTE AEREA (% CRU)				
%E PARTE AEREA				
NT RAIZ (MG/PLANTA)			10.55 (1.04)	7.77 (0.37)
NT RAIZ (% RESPECTO AL PESO SECO)			0.66	0.71
NT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)			5.49	4.45
15NT RAIZ (MG/PLANTA)				
15NT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)				
15NT RAIZ (% NDF)				
15NT RAIZ (% CRU)				
%E RAIZ				
NT PA+RA (MG/PLANTA)			19.04	13.21
NT PA+RA (% RESPECTO AL PESO SECO)			0.68	0.65
NT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)			9.92	7.56
15NT PA+RA (MG/PLANTA)				
15NT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)				
15NT PA+RA (% NDF)				
15NT PA+RA (% CRU)				
%E PA+RA (CALCULADO)				
NT SUELO AL COSECHAR (PPM)	539 (30)	593 (15)	643 (35)	674 (4)
15NT SUELO AL COSECHAR (PPM)		9.42 (0.84)		
15NT SUELO AL COSECHAR (% NDF)		5.74		
15NT SUELO AL COSECHAR (% CRU)		57.59		
%E SUELO AL COSECHAR		1.60 (0.11)		
%E SUELO AL SEMBRAR		2.87 (0.28)		
NT AL SEMBRAR - NT AL COSECHAR (PPM)	3	3	17	-33
15NT AL SEMBRAR - 15NT AL COSECHAR (PPM)		7.92		

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

4 B

CULTIVO	V	X	Z	AB
SUELO	DESNUDO SF	DESNUDO CF	MAIZ SF	MAIZ SF
HORIZONTE MUESTREADO	MU	MU	PD	PD
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	0-20	0-20	0-20	0-20
	SEP 1991	SEP 1991	ENE 1991	SEP 1991
BALANCE NT COSECHA				
NT PLANTA (PPM)			9.92	7.56
NT SUELO (PPM)	539	593	643	674
% RECUPERACION (RESPECTO NT SIEMBRA)	99.45	99.50	98.93	106.33
DISTRIBUCION DEL N-FER EN LA COSECHA				
PLANTA %				
SUELO %		57.59		
PERDIDAS %		42.41		
N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	8.40 (2.23)	50.26 (6.53)	2.92 (0.43)	1.48 (1.77)
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)		12.06 e		
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% NDF)		86.66		
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)		73.73		
%E N-NO3 SUELO AL COSECHAR		24.15 e		
%E N-NO3 SUELO AL SEMBRAR		19.42		
N-NO3 AL SEMBRAR - N-NO3 AL COSECHAR (PPM)	-1.83	-37.11	0.83 COS=MUEST	0.32
15N-NO3 AL SEMBRAR - 15N-NO3 AL COSECHAR (PPM)		-9.48		
N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	3.58 (0.66)	13.84 (1.53)	0.00	8.11 (1.99)
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)		2.66 e		
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% NDF)		69.41		
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)		16.26		
%E N-NH4 SUELO AL COSECHAR		18.39 e		
%E N-NH4 SUELO AL SEMBRAR		28.60		
N-NH4 AL SEMBRAR - N-NH4 AL COSECHAR (PPM)	-1.05	30.08	8.33 COS=MUEST	-4.28
15N-NH4 AL SEMBRAR - 15N-NH4 AL COSECHAR (PPM)		9.89		
N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)	11.98	64.10	2.92	9.59
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)		14.72 e		
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% NDF)		82.93		
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% CRU)		89.99		
%E N-MIN SUELO AL COSECHAR		22.96		
%E N-MIN SUELO AL SEMBRAR		26.51		
N-MIN AL SEMBRAR - N-MIN AL COSECHAR (PPM)	-2.88	-7.03	9.16 COS=MUEST	-3.96
15N-MIN AL SEMBRAR - 15N-MIN AL COSECHAR (PPM)		0.41 e		
N-BIO SUELO AL COSECHAR (PPM)			36.89 (9.72)	
N-BIO AL SEMBRAR - N BIO AL COSECHAR (PPM)			5.3	

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

5 B

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	V	X	Z	AB
	DESNUDO SF MU 0-20 SEP 1991	DESNUDO CF MU 0-20 SEP 1991	MAIZ SF PD 0-20 ENE 1991	MAIZ SF PD 0-20 SEP 1991
N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	16.08 (1.49)	-16.61 (3.17)??	44.36 (3.93)	17.09 (2.28)
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)		-10.68 ???		
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% MDF)		??		
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)		??		
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL COSECHAR		8.72 (1.27)		
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL SEMBRAR		24.09		
N-NaHCO3 AL SEMBRAR - N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)	-3.13	??HAY CAMBIO ??	?	2.36
15N-NaHCO3 AL SEMBRAR - 15N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)		??		
N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	69.95	78.64 (6.65)	126.551 (6.08)	97.83 (4.02)
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)		0.4		
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% MDF)		1.84		
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)		2.45		
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL COSECHAR		3.31 (0.21)		
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL SEMBRAR		8.14		
N-KMnO4 AL SEMBRAR - N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)	30.89	26.78	?	30.74
15N-KMnO4 AL SEMBRAR - 15N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)		-0.15		
N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)	181 (4)	199 (4)	208 (3)	200 (8)
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)		4.48 (0.60)		
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% MDF)		8.13		
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% CRU)		27.39		
%E N-NHD SUELO AL COSECHAR		2.24 (0.26)		
%E N-NHD SUELO AL SEMBRAR		4.75		
N-NHD AL SEMBRAR - N-NHD AL COSECHAR (PPM)	11	33	7	10
15N-NHD AL SEMBRAR - 15N-NHD AL COSECHAR (PPM)		6.93		
N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)	270 (10)	274 (13)	314 (12)	357 (21)
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)		1.68 e		
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% MDF)		2.21		
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% CRU)		10.27		
%E N-NHT SUELO AL COSECHAR		1.17 (0.26)		
%E N-NHT SUELO AL SEMBRAR		2.7		
N-NHND AL SEMBRAR - N-NHND AL COSECHAR (PPM)	-30	-21	52	-34
15N-NHND AL SEMBRAR - 15N-NHND AL COSECHAR (PPM)		0.71		
N-MNH SUELO AL COSECHAR (PPM)	116 (2)	95 (4)	71 (13)	93 (5)
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (PPM)		0.35 (0.06)		
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (% MDF)		1.33		
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (% CRU)		2.14		
%E N-MNH SUELO AL COSECHAR		0.30 (0.16)		
%E N-MNH SUELO AL SEMBRAR		0.34		
N-MNH AL SEMBRAR - N-MNH AL COSECHAR (PPM)	-6	16	38	15
15N-MNH AL SEMBRAR - 15N-MNH AL COSECHAR (PPM)		0.03		

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
 MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

6 B

CULTIVO	V	X	Z	AB
SUELO	DESNUDO SF	DESNUDO CF	MAIZ SF	MAIZ SF
HORIZONTE MUESTREADO	MU	MU	PD	PD
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	0-20	0-20	0-20	0-20
	SEP 1991	SEP 1991	ENE 1991	SEP 1991
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA NT	101	108	97	94
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA 15NT		69.11		
MINERALIZACION NETA (PPM)				
(N MIN P70 + N PLANTA) - N MIN P0	2.88	7.03	9.88	17.17
INMOVILIZACION NETA DE N-FER				
15N (PPM) 15NT-15N MIN		-5.3		
%NOF				
%CRU				

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

1 C

CULTIVO	AK	AM	AO	AQ
SUELO	MAIZ SF	MAIZ SF	MAIZ CF	MAIZ CF
HORIZONTE MUESTREADO	MU	MU	PD	MU
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	0-20	0-20	0-20	0-20
	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	SEP 1991
% HUMEDAD DEL SUELO MUESTREADO	3.67 (0.24)	10.70 (0.21)	12.60 (0.33)	10.70 (0.21)
NT DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	532 (8)	542 (6)	641 (17)	542 (6)
N-NO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	6.64 (0.42)	?	?	?
N-NH4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	7.47 (0.83)	?	?	?
N-MIN DEL SUELO MUESTREADO (PPM)	14.11	?	?	?
pH DEL SUELO MUESTREADO	4.93 (0.12)	4.33 (0.06)	5.10 (0.1)	4.33 (0.06)
N-NaHCO3 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *a	?	12.96 (5.05)	19.44 (0.54)	12.96 (5.05)
N-KMnO4 DEL SUELO MUESTREADO (PPM) *b	?	100 (8)	128 (5)	100 (8)
FECHA DE FERTILIZACION	27/02/91 PK	23/09/91 PK	23/09/91 MPK	23/09/91 MPK
FECHA DE SIEMBRA	20/02/91	30/09/91	30/09/91	30/09/91
FECHA DE INICIO	20/02/91	30/09/91	30/09/91	30/09/91
FECHA DE LA COSECHA (DURACION EN DIAS)	30/04/91 (70)	09/12/91 (70)	09/12/91 (70)	09/12/91 (70)
PESO DEL SUELO HUMEDO AÑADIDO AL POTE (KG)	2.00	2.00	2.00	2.00
% DE HUMEDAD DEL SUELO AL SEMBRAR	3.67	10.70	12.60	10.70
FORMA DE ADICION DEL FERTILIZANTE	100 ML/APLIC/15D 4 APLICACIONES	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA	50 ML SOL-FER/ POTE POR ARRIBA
NT DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO (mg/ml)			??2.1	??2.1
%E DE LA SOLUCION FERTILIZANTE DETERMINADO			27.69	27.69
N-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)			60.35	59.07
15N-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)			16.71	16.36
N-FER AÑADIDO (KG/HA) (1 HA = 3000 KG 0-20 CM)			181	177
K-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	8.30 POR APLIC	37.33	38.14	37.33
K-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	100	112	114	112
P-FER AÑADIDO TEORICO (PPM)	8.30 POR APLIC	37.33	38.14	37.33
P-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)	100	112	114	112
Ca-FER AÑADIDO TEORICO (KG/HA)				
FORMA DE MUESTREO DEL SUELO PARA LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# MUESTRAS MEZCLADAS)				
POR POTE (# DE POTES)	3	5	5	5
REPETICIONES EN LOS ANALISIS				
SUELO COMPOSITE (# DE REPETICIONES)				
POR POTE (# DE REPETICIONES)	1	1	1	1
% HUMEDAD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	?	12.93	14.92	12.83
pH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO	4.93	4.02	4.64	4.42
NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	532 (8)	542 (6)	700 (16)	596 (8)
15NT DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			17.00 (0.82)	17.34 (1.33)
%E DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			2.57 (0.07)	2.87 (0.28)

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

2 C

CULTIVO SUELO HORIZONTE MUESTREADO FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	AK	AM	AO	AQ
	MAIZ SF MU 0-20 EME 1991	MAIZ SF MU 0-20 SEP 1991	MAIZ CF PD 0-20 SEP 1991	MAIZ CF MU 0-20 SEP 1991
N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	6.57 (0.46)	4.13 (0.58)	13.15 (0.23)
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			3.22	2.58 (0.07)
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)				70.86
15N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)				15.77
%E N-NO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO				19.42 (0.65)
N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	2.53 (0.72)	55.03 (1.10)	43.92 (2.33)
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			14.38 (0.50)	12.55 (0.69)
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			94.04	103.19
15N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			85.75	76.73
%E N-NH4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			26.14 (0.81)	28.60 (1.21)
N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)		9.10	59.16	57.07
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			14.38	15.13
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			87.78	95.74
15N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			86.05	92.50
%E N-MIN DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (CALCULADO)			24.31	26.51
N-BIO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	34.26 (5.65)			
N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	12.95 (5.05)	18.43 (0.98)	8.75 (3.20)
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			2.70 (0.34)	1.01 (0.45)
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			52.91	41.69
15N-NaHCO3 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			16.16	6.17
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			22.05 (0.26)	24.09 (0.40)
N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	?	101	153 (9)	105 (7)
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.86 (0.46)	0.25 (1.24)
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			2.03	0.86
15N-KMnO4 DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			5.15	1.53
%E N-KMnO4 EXTRACTO DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			7.32 (0.26)	8.14 (0.90)
NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	185 (5)	192 (5)	239 (16)	232 (4)
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			15.77 (0.91)	11.41 (1.35)
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			23.83	17.76
15NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			94.37	69.76
%E NHD DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			6.40 (0.07)	4.75 (0.67)
NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	296 (3)	240 (6)	341 (11)	253 (8)
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.72 (0.42)	2.39 (1.02)
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			0.76	3.41
15NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			4.31	14.61
%E NHND DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			2.65 (0.06)	2.70 (0.26)
NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)	89 (2)	110 (8)	119 (8)	111 (6)
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (PPM)			0.66 (0.12)	0.38 (0.09)
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%NDF)			2.00	1.24
15NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO (%CRU)			3.95	2.32
%E NNH DEL SUELO RECIEN SEMBRADO			0.55 (0.10)	0.34 (0.07)

CUADRO COMPARATIVO DE LOS CULTIVOS EN POTE

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UMELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

3 C

CULTIVO	AK	AM	AD	AQ
	MAIZ SF	MAIZ SF	MAIZ CF	MAIZ CF
SUELO	MU	MU	PD	MU
HORIZONTE MUESTREADO	0-20	0-20	0-20	0-20
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	SEP 1991
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA NT	107	107	106	105
% DE REUPERACION HIDROLISIS SIEMBRA 15NT			103	85
COSECHA DIAS DESPUES DE LA SIEMBRA	70	70	70	70
ALTURA DE LA PLANTA (CM)	?	?	?	?
PESO SECO DE LA PARTE AEREA (G/PLANTA)	3.29 (0.22)	1.62 (0.23)	6.18 (0.72)	7.96 (1.01)
PESO SECO DE LA RAIZ (G/PLANTA)	2.08 (0.27)	1.78 (0.11)	4.50 (0.44)	5.48 (0.79)
PES SEC PA/PES SEC RA	1.58	0.91	1.37	1.45
FORMA DE UBICACION DE LAS RAIRES EN EL POTE	?50% FUERA SUELO	?40% FUERA SUELO	?40% FUERA SUELO	?40% FUERA SUELO
NT PARTE AEREA (MG/PLANTA)	13.17 (1.43)	8.36 (1.04)	32.19 (5.19)	52.57 (5.57)
NT PARTE AEREA (% RESPECTO AL PESO SECO)	0.40	0.52	0.52	0.66
NT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)	6.84	4.68	18.42	29.43
15NT PARTE AEREA (MG/PLANTA)			6.42 (0.73)	12.16 (1.12)
15NT PARTE AEREA (PPM RESPECTO AL SUELO)			3.67	6.81
15NT PARTE AEREA (% NDF)			72.03	83.54
15NT PARTE AEREA (% CRU)			21.98	41.63
%E PARTE AEREA			23.35 (0.30)	23.35 (0.37)
NT RAIZ (MG/PLANTA)	11.81 (2.25)	10.61 (0.94)	40.26 (1.59)	40.90 (4.89)
NT RAIZ (% RESPECTO AL PESO SECO)	0.57	0.60	0.89	0.75
NT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)	6.13	5.94	23.03	22.90
15NT RAIZ (MG/PLANTA)			9.24 (0.67)	9.73 (0.78)
15NT RAIZ (PPM RESPECTO AL SUELO)			5.29	5.45
15NT RAIZ (% NDF)			82.88	85.91
15NT RAIZ (% CRU)			31.63	33.31
%E RAIZ			23.09 (1.46)	22.57 (9.05)
NT PA+RA (MG/PLANTA)	24.98	18.97	72.45	93.47
NT PA+RA (% RESPECTO AL PESO SECO)	0.68	0.71	1.23	1.35
NT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)	12.97	10.62	41.45	52.33
15NT PA+RA (MG/PLANTA)			15.66	21.89
15NT PA+RA (PPM RESPECTO AL SUELO)			8.96	12.26
15NT PA+RA (% NDF)			78.06	84.58
15NT PA+RA (% CRU)			53.61	74.93
%E PA+RA (CALCULADO)			21.61	23.42
NT SUELO AL COSECHAR (PPM)	540 (16)	552 (7)	639 (44)	528 (38)
15NT SUELO AL COSECHAR (PPM)			4.23 (0.72)	3.09 (0.44)
15NT SUELO AL COSECHAR (% NDF)			2.39	2.11
15NT SUELO AL COSECHAR (% CRU)			25.31	18.89
%E SUELO AL COSECHAR			0.68 (0.13)	0.60 (0.09)
%E SUELO AL SEMBRAR			2.57 (0.07) ?	2.87 (0.28)
NT AL SEMBRAR - NT AL COSECHAR (PPM)	-8	-10	61	68
15NT AL SEMBRAR - 15NT AL COSECHAR (PPM)			12.77	14.25

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

4 C

CULTIVO	AK	AM	AO	AQ
SUELO	MAIZ SF	MAIZ SF	MAIZ CF	MAIZ CF
HORIZONTE MUESTREADO	MU	MU	PD	MU
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	0-20	0-20	0-20	0-20
	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	SEP 1991
<b>BALANCE NT COSECHA</b>				
NT PLANTA (PPM)	12.97	10.62	41.45	52.33
NT SUELO (PPM)	540	552	639	528
% RECUPERACION (RESPECTO NT SIEMBRA)	103.94	103.80	97.21	97.37
<b>DISTRIBUCION DEL N-FER EN LA COSECHA</b>				
PLANTA %			53.61	74.93
SUELO %			25.31	18.89
PERDIDAS %			21.08	6.18
N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	0.06 (0.01)	1.88 (0.44)	2.75 (0.50)	0.04 (0.06)
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)			?	?
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			?	?
15N-NO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			?	?
%E N-NO3 SUELO AL COSECHAR			?	?
%E N-NO3 SUELO AL SEMBRAR			?	?
N-NO3 AL SEMBRAR - N-NO3 AL COSECHAR (PPM)	6.58 COS=MUEST	4.69	1.38	13.11
15N-NO3 AL SEMBRAR - 15N-NO3 AL COSECHAR (PPM)			?	?
N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	0.00	2.56 (0.38)	7.12 (0.86)	1.41 (0.83)
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.41 e	?
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% MDF)			20.80	?
15N-NH4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			2.45	?
%E N-NH4 SUELO AL COSECHAR			5.14 e	?
%E N-NH4 SUELO AL SEMBRAR			26.14	?
N-NH4 AL SEMBRAR - N-NH4 AL COSECHAR (PPM)	7.47 COS=MUEST	-0.03	47.91	42.51
15N-NH4 AL SEMBRAR - 15N-NH4 AL COSECHAR (PPM)			13.97	?
N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)	0.06	4.44	9.87	1.45
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.41 e	?
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% MDF)			15.00	?
15N-MIN SUELO AL COSECHAR (% CRU)			2.45	?
%E N-MIN SUELO AL COSECHAR			4.15	?
%E N-MIN SUELO AL SEMBRAR			24.31	26.51
N-MIN AL SEMBRAR - N-MIN AL COSECHAR (PPM)	14.05 COS=MUEST	4.66	49.29	55.62
15N-MIN AL SEMBRAR - 15N-MIN AL COSECHAR (PPM)			13.97 e	15.13
N-BIO SUELO AL COSECHAR (PPM)	35.86 (17.87)			
N-BIO AL SEMBRAR - N BIO AL COSECHAR (PPM)	-1.6			

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UMELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA

5 C

MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

CULTIVO	AK	AM	AO	AQ
	MAIZ SF	MAIZ SF	MAIZ CF	MAIZ CF
SUELO	MU	MU	PD	MU
HORIZONTE MUESTREADO	0-20	0-20	0-20	0-20
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	SEP 1991
N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)	28.44 (5.43)	20.28 (2.25)	21.60 (6.39)	28.60 (5.38)
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.09 (0.08)e	0.16 (0.03)
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% NDF)			1.50	2.02
15N-NaHCO3 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			0.54	0.98
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL COSECHAR			1.61 (0.15)	0.54 (0.09)
%E N-NaHCO3 EXTRACTO DEL SUELO AL SEMBRAR			22.05	24.09
N-NaHCO3 AL SEMBRAR - N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)	?	-7.33	-3.17	-19.85
15N-NaHCO3 AL SEMBRAR - 15N-NaHCO3 AL COSECHAR (PPM)			2.61	0.85
N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)	77.71 (2.00)	81.82 (0.09)	107.78 (0.82)	56.52 (2.24)
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.66 (0.14)	0.29 (0.08)
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% NDF)			2.21	1.85
15N-KMnO4 SUELO AL COSECHAR (% CRU)			3.95	1.77
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL COSECHAR			0.87 (0.05)	0.58 (0.07)
%E N-KMnO4 DEL EXTRACTO AL SEMBRAR			7.32	8.14
N-KMnO4 AL SEMBRAR - N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)	?	19.02	44.97	48.9
15N-KMnO4 AL SEMBRAR - 15N-KMnO4 AL COSECHAR (PPM)			0.20	-0.04
N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)	180 (2)	178 (7)	204 (7)	183 (9)
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (PPM)			1.37 (0.06)	0.91 (0.32)
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% NDF)			2.43	1.80
15N-NHD SUELO AL COSECHAR (% CRU)			8.20	5.56
%E N-NHD SUELO AL COSECHAR			3.56 (0.62)	0.5 (0.19)
%E N-NHD SUELO AL SEMBRAR			6.4	4.75
N-NHD AL SEMBRAR - N-NHD AL COSECHAR (PPM)	5	14	35	49
15N-NHD AL SEMBRAR - 15N-NHD AL COSECHAR (PPM)			14.4	10.5
N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)	267 (11)	263 (5)	270 (11)	308 (7)
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (PPM)			2.61 (0.66)	1.86 (0.36)
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% NDF)			3.49	2.18
15N-NHND SUELO AL COSECHAR (% CRU)			15.62	11.37
%E N-NHT SUELO AL COSECHAR			0.70 (0.03)	0.58 (0.04)
%E N-NHT SUELO AL SEMBRAR			2.65	2.7
N-NHND AL SEMBRAR - N-NHND AL COSECHAR (PPM)	29	-23	1 71	-55
15N-NHND AL SEMBRAR - 15N-NHND AL COSECHAR (PPM)			-1.89	0.53
N-MNH SUELO AL COSECHAR (PPM)	96 (9)	111 (3)	92 (7)	92 (8)
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (PPM)			0.34 (0.04)	0.25 (0.05)
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (% NDF)			1.33	0.98
15N-MNH SUELO AL COSECHAR (% CRU)			2.03	1.53
%E N-MNH SUELO AL COSECHAR			0.37 (0.04)	0.27 (0.05)
%E N-MNH SUELO AL SEMBRAR			0.55	0.34
N-MNH AL SEMBRAR - N-MNH AL COSECHAR (PPM)	-7	-1	27	19
15N-MNH AL SEMBRAR - 15N-MNH AL COSECHAR (PPM)			0.32	0.13

C U A D R O C O M P A R A T I V O D E L O S C U L T I V O S E N P O T E

SUELO DEL JARDIN BOTANICO DE LA UNELLEZ (PD SUELO DESDE 1987 BAJO DIGITARIA  
 MU MAIZ DURANTE SECANO Y PANICUM DURANTE EL VERANO)

6 C

CULTIVO	AK	AM	AD	AQ
SUELO	MAIZ SF	MAIZ SF	MAIZ CF	MAIZ CF
HORIZONTE MUESTREADO	MU	MU	PD	MU
FECHA DE MUESTREO DEL SUELO	0-20	0-20	0-20	0-20
	ENE 1991	SEP 1991	SEP 1991	SEP 1991
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA NT	102	107	96	111
% RECUPERACION HIDROLISIS COSECHA 15NT			102.13	97.73
MINERALIZACION NETA (PPM)				
(N MIN P70 + N PLANTA) - N MIN P0	10.93	14.31	23.16	37.85
INMOVILIZACION NETA DE N-FER				
15N (PPM) 15NT-15N MIN			3.82	3.09
%NDF			2.19	2.12
%CRU			22.86	18.89

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)**

**ANNEXE IV**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## ANNEXE IV : INSTRUMENTATION INFORMATIQUE PRODUITE

**Introduction:** Il n'est pas encore possible de présenter le sous modèle-azote sol qui est en cours d'élaboration à partir des résultats obtenus dans le cadre du présent contrat.

Nous présentons donc ici deux produits existants:

- Le programme qui sert à la lecture des excès isotopiques mesurés par spectrométrie optique et qui est utilisé depuis deux ans.

- Le système d'entrée des données dans NCSWAP qui a servi de support à la première lecture de NCSWAP par D.CARDON. Il n'est actuellement pas utilisé mais pourra sans doute être remanié au moment de la mise en oeuvre de l'hybride CERES-NCSWAP en cours d'élaboration.

### 1. PROGRAMME DE LECTURE DES EXCES ISOTOPIQUES

**Moyens mis en oeuvre:** Deux mois de travail effectués par M. ZUVIA au début de l'année 90 à partir d'une carte Nautil achetée sur les conseils de la Maiso SOPRA.

La mesure des teneurs isotopique des échantillons par spectrométrie optique d'émission comporte un certain nombre d'étapes analytiques qu'il est difficile de simplifier, compte tenu de l'appareillage dont nous disposons à Mérida.

Par contre une amélioration de productivité pouvait alléger et améliorer substantiellement la lecture des spectres, desquels sont déduits par un calcul simple la teneur et l'excès isotopique de l'échantillon moyennant une courbe d'étalonnage.

On trouvera ci-dessous une brève description du programme qui sert maintenant à effectuer ces lectures. Qu'il suffise de savoir ici que cette amélioration représente environ un mi-temps de technicien pour l'instant. Il permet également de connecter la lecture des excès avec celle des quantités d'azote total de l'échantillon sous la forme d'un fichier externe récupérable pour entrer sans frappe ultérieure dans la feuille de calcul utilisée au laboratoire.

## Description du programme

Ce programme sert à lire l'intensité des pics de la lumière de fluorescence émise par les molécules  $^{14}\text{N}-^{14}\text{N}$  et  $^{14}\text{N}-^{15}\text{N}$  en faire le rapport, et en déduire l'excès isotopique des échantillons d'azote à partir desquels a été préparée l'ampoule de gaz.

Il a été réalisé avec le matériel suivant:

Carte analogique numérique ANA12-T Nautil 16 voies,  
12 bits, timer IBM-PC, PS-30

Langage Turbo Pascal 4.0

La lecture des spectres  $^{14}\text{N}-^{14}\text{N}$  (pic 28) et  $^{14}\text{N}-^{15}\text{N}$  (pic 29) se fait à une fréquence de 80 Hertz. Le programme digitalise 10 spectres d'émission et détermine la valeur de la ligne de base et les maxima des deux pics. Il établit la moyenne et le coefficient de variation des trois valeurs avant de calculer la relation:

$$T = \frac{p29 / p28}{2 + (p29 / p28)} * 100$$

où T = teneur isotopique

p29 = intensité du pic 29

p28 = intensité du pic 28

Le programme peut effectuer ce travail soit pour:

- calculer des paramètres de la droite de calibration en fonction d'étalons mesurés au spectromètre de masse

$E\% = aT - b$  où E% = Excès isotopique

T = % de  $^{15}\text{N}$  de l'échantillon

a,b = paramètres de la droite

- déterminer l'excès isotopique d'échantillons inconnus à partir de cette droite de calibration

- Les valeurs sont sauvegardées dans un fichier où se trouvent déjà le poids sec et le contenu en azote total ce qui évite toute frappe ultérieure.

## **Conclusion**

Après deux ans d'utilisation ce programme a fait preuve de son utilité. Compte tenu de l'expérience acquise nous pensons maintenant perfectionner en particulier pour le rendre plus accessible aux améliorations qui peuvent être apportées au niveau de la vitesse de lecture qui reste encore limitante.

## **2. DESCRIPTION DE NCSWAPDA**

### **2.1. Répertoires de NCSWAPDA**

Le fichier exécutable du programme principal et quelques autres fichiers qui lui sont annexés se trouvent dans le répertoire de travail défini lors de l'installation. Tous les autres fichiers ont été copiés dans des sous-répertoire du répertoire de travail dont le nom est immuable.

Ces sous répertoires sont au nombre de trois:

"\DATA" destinés aux fichiers de données,

"\GRAPH" destiné aux fichiers graphiques,

"\SCREEN" qui contient des fichiers entrant directement dans le fonctionnement du système mais dont le contenu peut être modifié sans intervenir dans le source du programme.

### **2.2.Fichiers de NCSWAPDA**

On distinguera les fichiers du programme proprement dit et les fichiers de données.

Fichiers d'installation

Un programme exécutable NCSWAPDA.EXE,

Un fichier qui contient les valeurs des paramètres de fonctionnement du programme "STATU.NCS".

### **2.3.Ressources communes**

Il s'agit du programme d'installation, du programme de BACKUP et de la routine de modification de la couleur.

### **2.4.Fonctionnement général du programme**

Quand le nombre des données à documenter est suffisant pour le justifier, ce qui est presque toujours le cas, leur documentation se fait à l'aide de un ou plusieurs écrans comportant un texte explicatif. La première tâche qu'effectue un programme est l'importation du texte et des caractéristiques des champs de données.

Ensuite les écrans sont documentés, certains pouvant être subdivisés en sous écrans documentés séparément l'un de l'autre. Suivant les cas, le retour aux écrans ou sous-écrans antérieurs est permis ou non, mais les menus affichés sont toujours normalisés.

Compte tenu des nécessités du programme, si une incohérence est constatée lors de la documentation d'un champ, il apparaît un message d'erreur et on ne peut sortir du champ qu'après documentation correcte. De même si l'analyse des données d'un écran ou d'un sous-écran révèle une incohérence, il apparaît un message d'erreur et on ne peut poursuivre le travail qu'après rectification. Dans ce dernier cas il arrive cependant que le message soit seulement d'avertissement de type: "fichier déjà existant"

On sait alors qu'en poursuivant le fichier va être effacé.

### 3. Fonctionnement spécifique de NCSWAPDA

Dès l'entrée dans NCSWAPDA on a le choix entre 7 options ou encore 6 programmes et la possibilité de sortir de NCSWAPDA. A titre d'exemple nous n'exposerons ici que ce qui concerne la création d'un jeu de données.

#### 3.1. Création d'un jeu de données

Elle se passe en 3 étapes:

- choix de l'emplacement du jeu de données,
- documentation des données initiales,
- fin de la documentation des données.

##### 3.1.1.Choix de l'emplacement.

S'il existe au moins un fichier de données le programme demande à l'utilisateur s'il désire créer un nouveau jeu de données.

Si tel n'est pas le cas, le programme recherche le nom de tous les fichiers de données et l'utilisateur choisit dans une fenêtre celui qui lui convient. Le nouveau jeu de données sera toujours placé en fin de fichier.

##### 3.1.2. Documentation des données initiales.

On considère comme données initiales toutes les données générales (nom, culture, etc...) et les données indispensables pour pouvoir établir le "plan" du jeu de données (Nombre d'horizons, nombre de fertilisations organiques, option d'utilisation d'azote marqué, etc...).

Ces données sont documentées dans une succession de 5 écrans. Il n'est pas possible de sortir du programme avant d'avoir terminé cette documentation.

##### 3.1.3. Fin de la documentation des données.

Dans une fenêtre apparaissent 5 options. Quatre correspondent à une demande de documentation d'un type de données (données

météorologiques par exemple), la cinquième demande la création du jeu de données.

Pour les quatre options de documentation de données apparaissent une suite d'écrans à remplir ou corriger (s'ils ont déjà été documentés). Après la documentation de chaque écran, l'utilisateur a la possibilité de renoncer à la saisie en cours (données de sol par exemple), pour passer à un autre type de données ou pour interrompre le travail. Dans ce dernier cas, le programme crée le fichier de travail "INTERMED.DAT" dans lequel il sauve la partie de données déjà documentée.

Dans les versions ultérieures, il est également prévu de pouvoir importer directement une partie des données à partir des jeux de données existants.

Par exemple, on pourra importer le sol d'une expérimentation et le combiner avec le climat d'une autre.

Lorsqu'on veut créer le jeu de données, le programme vérifie que celui-ci est complet. Dans le cas contraire il indique la partie à compléter sans effectuer le travail demandé.

### **3.2. Modification d'un jeu de données**

Cette option fonctionnera de la manière suivante:

-Recherche du jeu de données à modifier,

S'il y en a plus d'un, l'utilisateur choisit le fichier dans lequel se trouve le jeu de données,

-Fin de la documentation des données

En fonction des modifications apportées à la partie initiale, le programme juge quels sont les ensembles de données (édaphiques, biologiques etc...) du jeu de données antérieur, qui sont encore compatibles avec les nouvelles données initiales. Les valeurs de

ces données sont automatiquement affectées au jeu de données à modifier. La suite se déroule comme dans le cas de l'option 1.

### **3.3. Suppression d'un jeu de données**

Comme dans l'option 2 le programme recherche le jeu de données en question et ensuite le supprime du fichier de données considéré.

### **3.4. Complément d'une saisie de données**

Cette option n'apparaît que lorsqu'il existe un fichier "INTERMED.DAT", autrement dit lorsqu'une saisie de données antérieure a été interrompue.

Le programme entre directement dans la partie saisie de données et tout se déroule comme dans le cas des options 1 et 2.

### **3.5. Création d'un fichier NCSWAP**

L'utilisateur recherche le jeu de données à transformer de la même manière que pour les options 2 et 3.

Le programme lui demande alors le nom et le répertoire du fichier NCSWAP. Le reste du travail est transparent à l'utilisateur.

### **3.6. Impression des feuilles de données**

Le programme importe la partie texte des écrans correspondant aux données que l'on désire transcrire. Le nombre de feuilles d'impression est choisi par l'utilisateur en fonction de ses nécessités.

De cette façon les données sont transcrites sur des imprimés identiques à l'image apparaissant sur l'écran lors de la saisie et celle-ci peut facilement être déléguée, à un observateur de terrain pour noter des mesures.

## Conclusion

Le premier travail, compte tenu des améliorations en cours, pourrait intéresser les utilisateurs de spectromètres optiques qui ne disposent pas tous d'un système informatisé de lecture des pics.

Le second sera valorisé dans le cadre des résultats de notre actuel programme CEE dont la partie informatique est en cours d'élaboration sous la responsabilité de D. CARDON.

**Nom de l'organisme bénéficiaire :**

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE POUR LE  
DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)

**Nom du laboratoire :**

SOMOS ULA-ORSTOM

**Adresse :**

Apartado postal 30  
IPOSTEL LA HECHICERA  
MERIDA VENEZUELA

HETIER J.M., ZUVIA M. et CARDON D.

**SIMULATION MATHEMATIQUE DU CYCLE DE L'AZOTE  
DANS LES SOLS TROPICAUX  
(Série Barinas, llanos vénézuéliens)  
ANNEXE V**

Compte rendu de fin d'étude  
d'une recherche financée par  
le ministère de la recherche  
et de la technologie

Mai 1993

Décision d'aide N° 89 L 0531

## **ANNEXE V : Compte rendu des dépenses.**

La dotation initiale était de 250 KF dont il fallait déduire la TVA soit environ 37 KF et les frais de gestion de l'ORSTOM. Au total environ 190 KF ont été effectivement dépensés au Venezuela. A ce propos, on pourrait se demander pourquoi est il nécessaire d'appliquer la TVA pour des dépenses qui pour l'essentiel ont été effectuées hors de France?

### **Equipement: 70 KF dépensés**

Les principales dépenses d'équipement concernent le matériel informatique, deux micro-ordinateurs deux imprimantes à point et une imprimante à jet d'encre pour un total d'environ 53 KF.

L'économie réalisée sur l'équipement informatique par rapport aux prévisions de 75 KF a permis de faire face à des dépenses de petit équipement soit imprévues soit qui n'ont pas pu être assumées par la l'ORSTOM ou l'Université des Andes. Citons par exemple un appareil photo pour effectuer des observations de racines, agitateur rotatif, balance, matériel pour hydrolyses, pH mètre.

### **Personnel: 38 KF dépensés**

L'essentiel des dépenses de personnel concerne le salaire des techniciens associés à M.ZUVIA. Sur ce poste nous avons dépassé les prévisions qui étaient de 28 KF pour arriver à 38 KF. Ce dépassement est surtout du à la répétition des expériences et aux fortes augmentations de salaire qui ont accompagné les crises successives qu'a traversé le Venezuela pendant la réalisation du projet.

### **Fonctionnement: 82 KF dépensés**

Les dépenses de fonctionnement concernent surtout l'achat de réactifs et de petit matériel de verrerie consommable l'achat de nitrates et de sulfate d'ammonium marqués nécessaires pour des incubations de laboratoire et des cultures en serre. Mentionnons également deux factures d'analyses isotopiques du CNRS SCA SOLAIZE pour 23 KF correspondant à des mesures effectuées sur des échantillons très faiblement marqués.

Sur ce poste, les dépenses ont été comprimées, en particulier en supprimant les frais de déplacement qui ont été supportés par l'ORSTOM pour compenser le dépassement sur les salaires.

Les factures originales de ces dépenses ont été envoyées aux services financiers de l'ORSTOM où elles sont disponibles pour toute vérification éventuelle.