

# 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-lez-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.

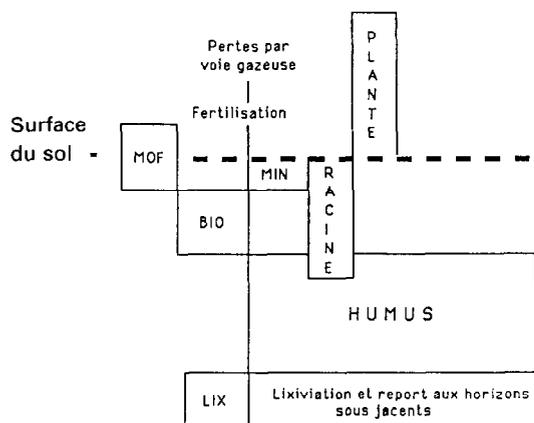


FIG. 1. - Schéma général des modèles étudiés.  
General design of the studied models.

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 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 CBio va de Bio à Hum 60 % du CBio reste dans Bio 20 % du CHum va de Hum à Bio 60 % du CHum 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/Nt. (N minéral compris) est < 15 80 % de MOF va vers Hum si le C/Nt. (N minéral compris) est < 25 100 % de MOF va vers N minéral si le C/Nt. (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. res. 0,6 % Nitrification de 50 à 2 kg ha <sup>-1</sup> Dénitrification de 50 à 2 kg ha <sup>-1</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.

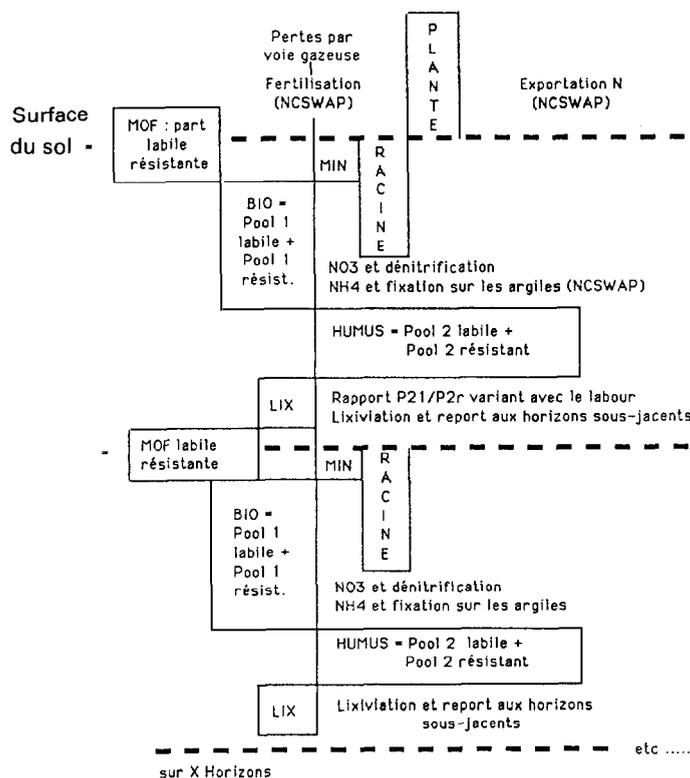


FIG. 2. – Schéma du modèle NCSOIL dans NCSWAP.  
 Design of NCSOIL model in NCSWAP.

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 I 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

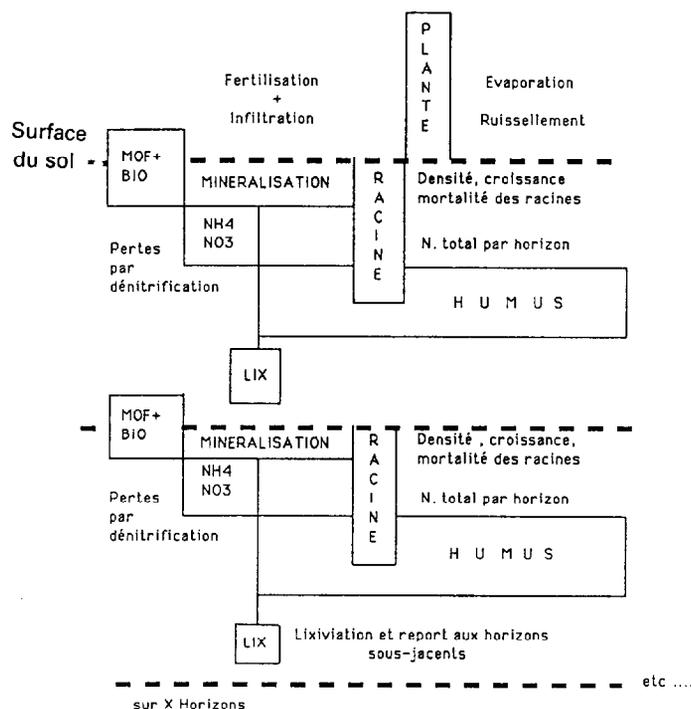


FIG. 3. – Schéma du modèle CERES.  
Design of CERES model.

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.

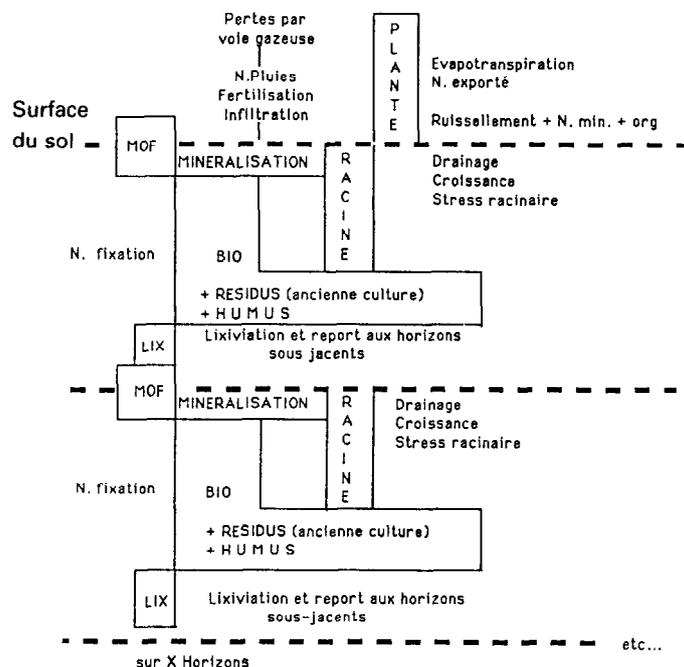


FIG. 4. – Schéma du modèle EPIC.  
Design of EPIC model.

### 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 NC SOIL 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 Broadbak 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. – PAPRAN : 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.