



Les indicateurs de la fertilité azotée des terres en région tropicale semi-aride

La fertilité azotée d'un sol, ou sa capacité à satisfaire les besoins azotés instantanés et totaux des cultures, fait l'objet de nombreux travaux. La recherche agronomique tente actuellement de mettre au point des indicateurs et des modèles de simulation à la fois fiables et pratiques dans leur mise en œuvre. Mais si la plupart des modèles concernent les régions tempérées, ils demandent encore à être adaptés aux spécificités des sols tropicaux.

L'évaluation de la fertilité azotée d'un sol est particulièrement utile au diagnostic de l'état du milieu, à la prévision de son évolution et à la conduite des cultures. L'azote est en effet l'élément minéral le plus souvent limitant, particulièrement en zone de savane semi-aride d'Afrique. Or, même en présence d'engrais minéraux, les réserves du sol fournissent au plus 60 à 80 % de l'azote nécessaire aux céréales (MUGHOGHO *et al.*, 1986). Cependant, la complexité de la dynamique de l'azote dans le sol rend cette estimation extrêmement difficile. Aucune des nombreuses techniques d'évaluation proposées ne s'est encore imposée comme référence, malgré la volonté unanime de disposer d'un ou de plusieurs indicateurs fiables.

Les indicateurs existants diffèrent selon leur caractère qualitatif ou quantitatif, leur facilité de mise en œuvre, leurs utilisateurs potentiels, etc. On peut les dissocier en deux types

correspondant à deux démarches, adoptées pour comprendre le comportement minéral des sols (figure 1).

La première démarche est explicative, elle définit les variables intervenant dans la fourniture d'azote par le sol, et leurs lois d'action. Des modèles mécanistes sont ensuite élaborés pour simuler le fonctionnement du cycle de l'azote dans l'agrosystème.

La seconde démarche est corrélative : elle identifie des indicateurs empiriques, à partir desquels sont conçus des modèles simples, qui évaluent la fertilité du sol et simulent son évolution pour constituer des outils d'aide à la gestion des cultures.

La démarche explicative

Les mécanismes du cycle de l'azote ont été abondamment étudiés sous les climats tempérés et ne diffèrent pas fondamentalement en climat tropical (GREENLAND *et al.*, 1992). Ils présentent cependant quelques particularités, notamment le rôle prépondérant des micro-organismes du sol.

En climat tempéré, la dynamique de l'azote du sol est principalement conditionnée par la température, bien que l'humidité puisse devenir limitante en cas de forte sécheresse estivale ou d'excès d'eau associé à un pH acide. La minéralisation de l'azote organique, très faible en dessous de 5 °C, augmente de façon exponentielle jusqu'à 30 °C.

Dans les sols des régions tropicales à longue saison sèche, la dynamique de l'azote dépend beaucoup de l'humidité, les températures n'étant pas limitantes. Les alternances de dessiccation et d'humidification, associées aux températures élevées, accélèrent l'évolution de la matière organique. Les micro-organismes, en vie ralentie pendant la

L. RUIZ, F. GANRY,
V. WANEUKEM,
R. OLIVER, P. SIBAND
CIRAD-CA, BP 5035
34032 Montpellier
Cedex 1, France



Figure 1. Les deux approches de la fertilité azotée des sols (d'après SEBILLOTE, 1990).

saison sèche, connaissent un regain d'activité brutal dès les premières pluies : on observe alors un pic de minéralisation. Ensuite, pendant l'essentiel du cycle cultural et malgré l'humidité, la minéralisation est très faible ou nulle, excepté dans la rhizosphère où elle est intense (DOMMERGUES *et al.*, 1980). En dernière partie du cycle cultural, qui correspond à la fin de la saison pluvieuse, l'absorption racinaire diminue, les exsudats racinaires augmentent et l'activité microbienne reprend. L'azote minéral est en majorité rapidement réorganisé (BADIANE, 1993). La quantité d'azote ainsi accumulée en fin de cycle dans la biomasse microbienne détermine en grande partie l'intensité du pic de minéralisation l'année suivante. La solution du sol est généralement très pauvre en azote minéral, sauf lors du pic de minéralisation.

L'intensité de l'activité minéralisatrice dans le sol est un facteur essentiel de la fertilité azotée. Dans les régions tropicales, la recherche d'indicateurs de la fertilité azotée doit donc

tenir compte de certaines particularités : évolution rapide de la matière organique, importance de l'effet rhizosphérique, réserve d'azote minéralisable souvent limitante.

Estimer la capacité du sol à fournir de l'azote

Si la plupart des mécanismes intervenant dans le cycle de l'azote sont bien connus, leur quantification reste délicate en raison de leur multiplicité, de leurs interactions et de la diversité des formes d'azote. Ainsi, le potentiel minéralisateur du sol dépend de la quantité mais aussi de la nature de la matière organique. Plus de la moitié de l'azote organique étant de nature chimique inconnue ou difficile à identifier précisément, on définit alors des « compartiments » homogènes quant à leur tendance à la minéralisation. Trois types de méthode peuvent être cités pour estimer ce potentiel minéralisateur.

Des méthodes chimiques ou physiques sont utilisées pour caractériser et quantifier des fractions d'azote organique (EGOUMENIDES *et al.*, 1987 ; TURCHENEK et OADES, 1979). Les fractions ne correspondent pas nécessairement aux compartiments fonctionnels définis précédemment (CATROUX *et al.*, 1987), mais l'intérêt de ces techniques réside dans la rapidité des mesures et leur facilité de standardisation.

Les méthodes biologiques d'incubation déterminent la quantité d'azote minéralisé sous l'action des micro-organismes, dans un échantillon de terre incubé en conditions contrôlées. Une modélisation mathématique des courbes de minéralisation permet de quantifier la réserve d'azote minéralisable (STANDFORD et SMITH, 1972). Cependant, si cette mesure reflète le potentiel de minéralisation d'un sol en laboratoire, cette aptitude fonctionnelle ne peut être attribuée précisément à un ou à plusieurs compartiments physiques ou chimiques déterminés. De plus, en zone tropicale sèche, les exsudats racinaires constituent une source de carbone organique constamment renouvelée qui contribue au développement microbien dans la rhizosphère. Ces conditions ne sont pas reproduites en laboratoire et les mesures ne reflètent qu'imparfaitement les conditions réelles.

L'emploi des méthodes isotopiques avec l'isotope 15 de l'azote (^{15}N) permet d'évaluer les participations respectives du sol et d'un engrais marqué à l'alimentation d'une plante

test. On estime ainsi la réserve d'azote mobilisable (AIEA, 1983). L'étude quantitative du cycle de l'azote dans les agrosystèmes a considérablement progressé grâce à l'emploi de l'azote 15 , bien que sa mise en œuvre soit lourde (GUIRAUD, 1984). Mais comme précédemment, la capacité fonctionnelle du sol à fournir de l'azote ne peut être reliée à sa composition chimique ou physique.

L'élaboration de modèles mécanistes

De nombreux auteurs ont tenté de formaliser les flux d'azote dans le sol par la conception de modèles mécanistes. De complexité variable, ils simulent un aspect particulier du cycle de l'azote — tel que la lixiviation, la dénitrification ou la volatilisation de l'ammonium — ou reproduisent le cycle de l'azote dans le sol.

L'exactitude du modèle dépend du niveau de précision des données, en particulier relatives à la matière organique. Les modèles les plus simples font intervenir un compartiment d'entrée (matière organique fraîche ou litière) et un compartiment humique (matière organique à évolution lente). Les plus complexes séparent les résidus végétaux en quatre groupes (protéines, sucres, cellulose, lignine) et la matière organique en compartiments plus ou moins stables, selon leur origine microbienne ou humique (FRIESSEL et VAN VEEN, 1978). Ces fractions sont caractérisées par des vitesses de minéralisation, déduites des expériences d'incubation, et ne sont pas issues de méthodes de séparation.

Les nombreux modèles mécanistes élaborés en climat tempéré — NCSWAP (CLAY *et al.*, 1985) ; CERES (JONES et KINIRY, 1986) ; EPIC (WILLIAMS *et al.*, 1985) ; CENTURY (PARTON *et al.*, 1987) — n'ont pas encore été transposés avec succès en région tropicale (GOLDWIN *et al.*, 1988, pour CERES ; PARTON *et al.*, 1989, pour CENTURY). En effet, les connaissances actuelles sur la dynamique de l'azote en zone tropicale paraissent incomplètes pour élaborer un modèle de fonctionnement satisfaisant (PIERI, 1989). La difficulté majeure est la définition des compartiments fonctionnels du système parallèlement à l'élaboration de méthodes fiables pour les quantifier, tout au moins pendant la phase de validation du modèle. Actuellement, cette difficulté est le plus souvent éludée en ajustant les paramètres par approximation (HETIER *et al.*, 1990).



Dosage simultané
du carbone et de l'azote
par la méthode DUMAS.
Appareil CHN Leco.
Cliché T. Erwin

Cependant, la démarche modélisatrice a l'avantage de structurer les connaissances et d'orienter les axes de recherche en fonction des lacunes mises à jour. Par exemple, elle a permis de souligner le rôle prépondérant de la biomasse microbienne dans le stockage de l'azote.

En ce qui concerne les recherches en zone tropicale, elles s'orientent à la fois vers un ajustement des modèles existants et vers la prise en compte de nouvelles variables spécifiques à ces zones telles que les phénomènes rhizosphériques.

En résumé, cette démarche, dite mécaniste ou explicative, s'appuie sur la connaissance des lois qui régissent les transferts et les stockages de l'azote ; elle se heurte à la difficulté d'identifier et de quantifier les compartiments fonctionnels. De nombreux travaux sont

engagés afin de préciser les valeurs seuils des variables pertinentes, utilisables comme indicateurs significatifs et traduisant des ruptures dans les mécanismes de réaction d'un peuplement végétal aux états du milieu.

La démarche corrélative

La seconde démarche consiste à caractériser la fertilité du sol par des paramètres facilement mesurables en dégagant des corrélations statistiques. Elle repose sur le choix d'un critère biologique qui reflète l'aptitude du sol à fournir de l'azote à un peuplement végétal. Dans la majorité des cas, il s'agit du rendement, ou d'une de ses composantes ou encore de la quantité d'azote prélevée. Le potentiel de minéralisation d'un sol, issu des méthodes d'incubation, est parfois utilisé. Les indicateurs choisis sont supposés spécifiques de la fertilité azotée ; ils doivent être sensibles et significatifs. Cette démarche n'implique pas la connaissance précise de l'origine des informations mesurées ; c'est là son intérêt majeur.

Les indicateurs fondés sur l'étude du végétal

La plante est le révélateur le plus pertinent de la fertilité azotée du sol (excepté pour les plantes fixatrices d'azote et en conditions non limitantes par ailleurs) ; c'est surtout le produit final et la source de revenu de l'agriculteur.

Le rendement relatif, issu de l'essai comparatif au champ, est un critère fréquemment employé : il exprime l'augmentation de rendement liée à la fertilisation. L'extrapolation à des conditions pédoclimatiques voisines implique de répéter l'expérience sur une large gamme de situations, ce qui alourdit la méthode et la renchérit. Celle-ci se révèle plutôt adaptée pour préciser d'autres indicateurs plus simples dans leur mise en œuvre.

Les essais en pots sont plus accessibles et permettent de tester une plus large gamme de sols. L'extrapolation de leurs résultats est cependant hasardeuse en particulier parce que le volume de sol à la disposition des plantes est cinq à cinquante fois plus faible qu'au champ et que les processus biologiques sont modifiés.

L'observation visuelle de la plante permet de déceler des carences azotées graves. Elle ne

peut être utilisée comme indicateur de la fertilité azotée.

L'analyse minérale de la plante repose sur le principe suivant : les fluctuations de l'alimentation minérale se traduisent par des teneurs variables en éléments minéraux du végétal, sans évolution proportionnelle du rendement (SIBAND, 1990).

Ainsi, le diagnostic foliaire — composition minérale d'une feuille sélectionnée — peut être utilisé dans le cas des cultures pérennes comme indicateur de satisfaction en besoins minéraux et pour prévoir le rendement (MARTIN PREVEL *et al.*, 1984). Dans le cas des cultures annuelles, son emploi est rendu difficile par les nombreuses références nécessaires à l'étalonnage des courbes nutritionnelles, très sensibles aux variations de nombreux facteurs — édaphiques, climatiques, biologiques (BRAUD, 1984). L'indice DRIS (*Diagnosis and Recommendation Integrated System* ; BEAUFILS, 1973), obtenu par l'analyse des équilibres nutritionnels, réduit l'effet des facteurs extérieurs mais nécessite néanmoins un référentiel important.

L'analyse des nitrates dans certaines parties du végétal (feuille, pétiole, base de tige) constitue un test pratique de nutrition azotée instantanée, réalisable au champ. Ce test est intéressant pour prévenir un risque de déficience à court terme — une semaine (JUSTE, 1993) —, mais ne donne aucune indication sur la fourniture d'azote par le sol jusqu'à la récolte (GONZALEZ-MONTANER *et al.*, 1987 ; FOX *et al.*, 1989). Par ailleurs, les teneurs critiques proposées sont très variables.

Le prélèvement d'azote par les cultures en cours de croissance a été mesuré et décrit par une relation appelée loi de dilution de l'azote, fonction de la nutrition azotée. A partir du poids de la biomasse aérienne et de sa teneur en azote, une courbe critique est établie, en deçà de laquelle l'azote devient un facteur limitant de la croissance (SALETTE et LEMAIRE, 1981 ; GREENWOOD, 1982). Des tests effectués sur différentes espèces cultivées ont confirmé la pertinence de cette loi, dont l'emploi n'exige pas l'élaboration préalable d'une gamme étalon. L'indice de nutrition azotée (INN) est défini par le rapport entre la teneur en azote et la teneur optimale (LEMAIRE *et al.*, 1989). Cet indice n'exprime qu'indirectement la fertilité azotée d'un sol : des travaux sont en cours pour préciser les conditions de son emploi dans ce but.

Une approche nouvelle consiste à étudier la flore adventice (LE BOURGEOIS, 1993). Son utilisation pratique est conditionnée par l'obtention de références sur une gamme suffisante d'espèces, choisies pour leur sensibilité aux variations d'alimentation azotée.

En bref, si la plante reflète l'aptitude du sol (sauf pour les plantes fixatrices d'azote) à fournir de l'azote tout au long du cycle cultural, d'autres facteurs, parfois limitants, interviennent dans son alimentation azotée. Les résultats sont difficilement extrapolables à d'autres espèces ou d'autres variétés. De plus, les techniques qui se réfèrent à l'étude du végétal ne sont utilisables qu'en cours de culture.

Les indicateurs fondés sur l'analyse de sol

L'analyse de terre, rapide et facilement standardisable, caractérise le sol avant la mise en place de la culture. Elle consiste à doser les éléments nutritifs dans un échantillon de sol, puis à les comparer avec un référentiel obtenu dans des conditions pédoclimatiques voisines. Ce référentiel relie les quantités mesurées dans le sol à l'aptitude de ce dernier à fournir les éléments aux cultures (cette aptitude ayant été appréciée par des essais agronomiques). Par exemple, l'interprétation des analyses de sols tropicaux ne pourra se faire à partir des résultats obtenus en climat tempéré.

Les indicateurs de fertilité azotée élaborés à partir de la composition chimique du sol sont le plus souvent la quantité de matière organique ou d'azote total. Dans un but pratique, on admet que la quantité d'azote minéralisé chaque année est de l'ordre de 1 à 3 % de l'azote total sous climat tempéré et de 2 à 5 % sous climat tropical. Mais cet ordre de grandeur, trop imprécis, n'est utilisable que pour prévenir une carence sévère. Différentes voies sont explorées pour affiner la relation entre la mesure de l'azote total et l'azote effectivement minéralisé en cours de culture. Par exemple, la valeur du rapport C/N de la matière organique du sol, approximative en raison de la méthode de dosage du carbone, est souvent utilisée mais ne traduit que partiellement l'aptitude du sol à la minéralisation.

DABIN (1961) évalue la fertilité azotée à partir de l'azote total et du pH. D'autres auteurs proposent des formules mathématiques

empiriques donnant un coefficient de minéralisation de l'azote à partir de la granulométrie du sol, de sa teneur en calcaire (REMY et MARIN-LAFLECHE, 1974 ; DELPHIN, 1986), ainsi que du pH et de la température moyenne annuelle (REMY et VIAUX, 1983). L'utilisation de ces formules empiriques, indicatives, reste circonscrite aux régions d'où sont issues les références (CARLOTTI, 1992).

Les différentes fractions de l'azote

D'autres indicateurs ont été proposés à partir de l'analyse de certaines formes d'azote du sol.

Les dosages de nitrates dans des conditions définies (tests nitrates, à la sortie de l'hiver) sont de plus en plus utilisés en climat tempéré pour optimiser la fertilisation (CORPEN, 1988). Ces tests sont aussi employés dans le cas de sols riches pour tenter de minimiser la pollution des nappes, liée à l'apport d'engrais ou de résidus organiques. Ils sont peu pertinents dans les sols tropicaux, où les teneurs en nitrates sont très fluctuantes et le plus souvent très faibles.

La quantité d'azote immobilisé dans la biomasse microbienne serait aussi un indicateur des réserves d'azote et permettrait de prévoir l'intensité du pic de minéralisation (SPARLING et ROSS, 1993). Mais sa mesure reste délicate.

De nombreux tests reposent sur les méthodes de fractionnement chimique de l'azote (STANDFORD, 1982). Mais l'importance des fractions obtenues semble davantage liée au type pédologique ou au degré d'humification qu'à la disponibilité de l'azote.

Une étude menée sur différents sols d'Afrique de l'Ouest montre que les plantes s'alimentent principalement à partir de la fraction d'azote hydrolysable non distillable (Nhnd) obtenue par hydrolyse acide, indépendamment du type pédologique (EGOUMENIDES, 1990). Les teneurs en Nhnd sont apparues dans certains cas bien corrélées avec les exportations d'azote par les plantes, en culture traditionnelle sans engrais (figure 2 ; WANEUKEM et GANRY, 1992). Par ailleurs, le rapport $I = Nhnd / Nhd$ (Nhd étant l'azote hydrolysable distillable), indépendant de l'azote total, traduirait de façon qualitative la capacité du sol à fournir de l'azote, tandis que la valeur $Q = Nhnd - Nhd$ la quantifie.

Selon d'autres auteurs, le rapport I mesuré en profondeur serait une constante caractéristique du sol, qu'ils nomment k (N'CHO, 1991) et la différence Nhd - [k x Nhd], mesurée en surface, serait un critère d'appréciation de la fertilité azotée. Cette différence apparaît linéairement corrélée aux valeurs de la réserve d'azote minéralisable mesurée par des méthodes isotopiques, obtenues dans des situations contrastées (figure 3).

Les analyses de sol constituent de précieux outils avant la mise en culture et sont d'un usage facile. Cependant, les indicateurs qui en sont extraits sont instantanés, difficiles à relier à des flux. De plus, les racines modifient leur environnement physico-chimique et biologique de façon déterminante pour la disponibilité des éléments (effet rhizosphérique) ; ces modifications, spécifiques à la plante cultivée mais aussi à la flore adventice, n'apparaissent pas à l'analyse d'un échantillon moyen de sol avant culture.

Les modèles empiriques

Afin de piloter la fertilisation azotée ou d'évaluer la durabilité d'un système de culture dans un environnement donné, des modèles empiriques ou semi-empiriques ont été proposés. Dans cette optique, l'estimation du bilan de l'azote à partir des entrées et des sorties du système permet de prévoir son évolution et d'apprécier l'opportunité des améliorations techniques (GANRY, 1990).

En climat tempéré, dans la plupart des pays développés, les recommandations de fertilisation sont faites à partir des modèles de bilan prévisionnel de l'azote minéral, de type additif (entrées et sorties d'azote minéral). Ils s'appuient sur la teneur en nitrates du sol mesurée à l'ouverture du bilan, sur l'évaluation de la fourniture d'azote par le sol à partir de références régionales et sur l'objectif de rendement. Ce sont par exemple la méthode du bilan prévisionnel en France (REMY et HEBERT, 1977), la méthode N-min en Allemagne et au Canada (WEHRMANN et SCHARPF, 1986), le modèle de GIESSEN (MENGEL, 1991). Grâce à leur simplicité, ces modèles sont de bons outils pratiques de pilotage de la fertilisation lorsqu'ils s'appuient sur un référentiel précis obtenu dans des conditions similaires. La gestion de l'azote à l'échelle de la parcelle peut aussi être intégrée à une gestion plus globale à l'échelle de l'exploitation (SEBILLOTTE, 1991).

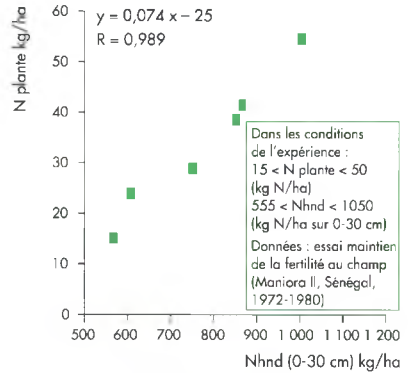


Figure 2. Corrélation entre l'azote total de la plante entière à la récolte et la quantité d'azote hydrolysable non distillable (Nhd) dans le sol avant la récolte (WANEUKEM et GANRY, 1992).

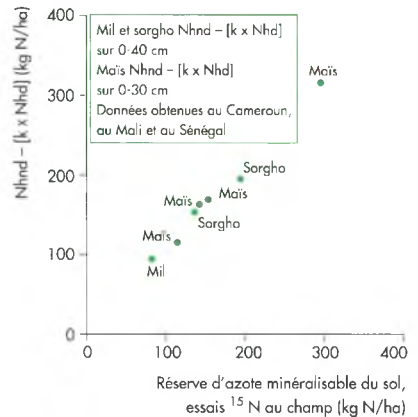


Figure 3. Relation entre la réserve d'azote mobilisable du sol mesurée par la méthode isotopique sur trois céréales et la différence Nhd - [k x Nhd] (GANRY, non publié).

Ce type de modèle n'a apparemment jamais été testé en Afrique de l'Ouest. L'élaboration d'un modèle simple, adapté aux particularités de la zone, pourrait constituer un objectif important de la recherche appliquée.

En fait, aucun des nombreux tests proposés n'est largement reconnu pour refléter isolément la fertilité azotée d'un sol, mais la complémentarité des divers indicateurs offre des perspectives intéressantes. En outre, la

prise en compte des phénomènes rhizosphériques dans l'interprétation des analyses de sol devrait être développée pour affiner les recommandations de fertilisation.

Divergence ou complémentarité ?

La fertilité d'un sol ne peut faire l'objet d'un indicateur unique et simple puisqu'elle résulte d'un ensemble complexe d'interactions dont les origines sont aussi le climat, la plante cultivée (effet rhizosphérique), la faune, la flore adventice, la conduite culturale (irrigation, labour, fumure...).

De même, la capacité intrinsèque d'un sol à fournir de l'azote est évolutive et la notion de fertilité azotée est appréciée différemment selon le rendement recherché ou l'objectif poursuivi — connaissance des mécanismes, augmentation des rendements ou conservation des sols.

Cependant, plusieurs approches ont pu être approfondies et fournir des indicateurs suffisamment significatifs pour comparer les divers comportements de sols et pour adapter les fumures minérales aux conditions du milieu et aux objectifs (rendement, qualité, maintien de la fertilité, etc.).

La poursuite de ces travaux doit permettre d'affiner les méthodes de mesure, les connaissances et les outils de conduite agronomique. Mais pour être efficaces, ils devront s'appuyer davantage sur la complémentarité des études relatives à la plante et au sol.

Les démarches ont été distinguées artificiellement par simplification. En pratique, elles se recoupent largement et peuvent être synergiques : des indicateurs pertinents, d'emploi facile et largement reconnus (démarche corrélative) seront issus des recherches sur les mécanismes et les états du cycle de l'azote (démarche explicative).

Enfin, un effort devrait être porté en priorité sur l'adaptation des modèles existants aux spécificités des sols tropicaux.



Bibliographie

AIEA, 1983. A guide to the use of nitrogen 15 and radioisotopes in studies of plant nutrition: calculations and interpretation of data. A technical document, Vienna, Austria, AIEA-TECDOC-288, 63 p.

BADIANE A.-N., 1993. Le statut organique des sols sableux de la zone centre-nord du Sénégal. Thèse de doctorat, INPL-ENSAIA, Nancy, France, 200 p.

BEAUFILS E.-R., 1973. Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS). University of Natal-Pietermaritzbourg. Soil Sciences Bulletin 1, 132 p.

BRAUD M., 1984. In : MARTIN PREVEL P., GAGNARD J., GAUTHIER P. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. Techniques et Documentation, Lavoisier, Paris, France, p. 559-576.

CARLOTTI B., 1992. Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures. CORPEN, ministère de l'agriculture, ministère de l'environnement, Paris, France, 225 p.

CATROUX G., CHAUSSOD R., NICOLARDOT B., 1987. Appréciation de la fourniture d'azote par le sol. In : Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France, 73 : 71-79.

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 Science of the American journal, 49: 322-325.

CORPEN, 1988. Analyses rapides des nitrates dans les sols agricoles. Intérêts et limites. Précaution pour leur mise en œuvre. Ministère de l'agriculture, ministère de l'environnement, Paris, France, 36 p.

DABIN B., 1961. Les facteurs de la fertilité des sols des régions tropicales en culture irriguée. Bulletin de l'association française pour l'étude du sol, numéro spécial, p. 108-130.

DELPHIN J.-E., 1986. Evaluation du pouvoir minéralisateur de sols agricoles en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques. Agronomie, 6 : 453-458.

DOMMERGUES Y., GARCIA J.-L., GANRY F., 1980. Microbiological consideration of the nitrogen cycle in West African ecosystems. In: Nitrogen cycling in West African ecosystems. T. Rosswall (Ed), SCOPE/UNEP, p. 55-72.

EGOUMENIDES C., 1990. Fractions organiques de l'azote dans les sols tropicaux et fertilité azotée. In : Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, 12-15 septembre 1989, p. 317-326. IRAT (éd.), CIRAD, Montpellier, France.

EGOUMENIDES C., RISTERUCCI A., MELEBOU K.E., 1987. Appréciation de la fertilité azotée des sols tropicaux : étude des fractions organiques de l'azote. L'Agronomie Tropicale, 42 (2) : 85-93.

FOX R.H., ROTH G.W., IVERSEN K.V., PIEKIELEEK W.P., 1989. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. Agronomy journal, 81: 971-974.

FRIESSEL M.J., VAN VEEN J.A., 1978. A critique of computer simulation modelling for nitrogen in irrigated croplands. In: Nielsen D.R. and MacDonald J.G. (Eds). Nitrogen in the environment, Volume 1, Academic press, New York, Etats-Unis, p. 145-162.

GANRY F., 1990. Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale

sèche. Thèse de doctorat d'Etat, université de Nancy I, France, 255 p.

GIGOU J., CHABALIER P.-F., 1987. L'utilisation de l'engrais azoté par les cultures annuelles en Côte d'Ivoire. *L'Agronomie Tropicale*, 42 (3) : 171-179.

GIROUX M., N'DAYEGAMIYE A., TRAN T.S. 1992. Evaluation de la fertilité azotée des sols. *Agrosol*, V (2) : 10-17.

GOLDWIN D.C., SINGH U., ALAGERSWAMY G., RITCHIE J.T., 1988. Simulation of N dynamics in cropping systems of the semiarid tropics. *In: Soil fertility and fertilizer management in semiarid tropical India. Proceedings of a colloquium, ICRISAT center, Patancheru, India, 10-11 October, 1988*, p. 119-128. C.B. Christianson (Ed).

GONZALEZ-MONTANER J., MEYNARD J.-M., MARY B., 1987. Contrôle de la nutrition azotée du blé par l'analyse des teneurs en nitrates dans la plante. *In: Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 73 : 105-115.

GREENLAND D.J., WILD A., ADAMS D., 1992. Organic matter dynamics in soils of the tropics. *In: Myths and science of soils of the tropics. Proceedings of an international symposium. Las Vegas, Nevada, October 17, 1989*, p. 17-34. Lal R., Sanchez P.A. (Eds), ASA, WASWCS.

GREENWOOD D.J., 1982. Modelling crop response to nitrogen fertilizer. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London-B*, 296: 351-362.

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 de doctorat d'Etat, université P. et M. Curie, Paris VI, France, 335 p.

HETIER J.-M., ZUVIA M., HOUOT S., THIERY J.-M., 1990. Comparaison de trois modèles choisis pour la simulation du cycle de l'azote dans les agrosystèmes tropicaux. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, 24 : 443-451.

JONES C.A., KINIRY J.R., 1986. CERES-Maize: a simulation model of maize growth and development. Texas A. and M. University Press, USA.

JUSTE E., 1993. Diagnostic de la nutrition azotée du blé, à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation. Thèse de doctorat, INA-PG, Paris, France, 227 p.

LE BOURGEOIS T., 1993. Les mauvaises herbes dans la rotation cotonnière au Nord-Cameroun (Afrique). Amplitude d'habitat et degré d'infestation, phénologie. Thèse de doctorat, université de Montpellier II, France, 244 p.

LEMAIRE G., GASTAL F., SALETTE J., 1989. Analysis of the effect of N nutrition on dry matter yield of a sward by reference to potential yield and optimum N content. *In: XVI International Grassland Congress, Nice, France*, p. 179-180.

MARTIN PREVEL P., GAGNARD J., GAUTHIER P., 1984. L'analyse végétale dans le contrôle de l'alimentation des plantes tempérées et tropicales. *Techniques et Documentation, Lavoisier, Paris, France*, 810 p.

MENDEL I.K., 1991. Available nitrogen in soils and its determination by the "Nmin-method" and by electrodialysis (EUF). *Fertilizer Research*, 28: 251-262.

MUGHOGHO S.K., BATIONO A., CHRISTIANSON B., VLEK P.L.G., 1986. Management of nitrogen fertilizers for tropical african soils. *In: Management of nitrogen and phosphorus fertilizers in sub-Saharan Africa. Proceedings of a symposium, Lomé, Togo, March 25-28, 1985*, p. 117-172. A. Uzo Mokwunye and P.L.G. Vlek (Eds). IFDC, USA.

N'CHO B.S., 1991. Modélisation de l'accès des racines de maïs (*Zea mays*) à l'azote du sol. Expérimentation au champ en Centre Côte d'Ivoire. CNEARC, Montpellier, France, 27 p.

PARTON W.J., SANFORD R.L., SANCHEZ P.A., STEWARD J.W.B., 1989. Modeling soil organic matter in tropical soils. *In: Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems. Hawaii, USA, NIFTAL Project, university of Hawaii*, p. 153-172. Coleman D.C., Oades J.M. and Uehara G. (Eds).

PARTON W.J., SCHIMEL D.S., COLE C.V., OJIMA D.S., 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 51: 1 173-1 179.

PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au sud du Sahara. Ministère de la coopération, CIRAD (éd.), Paris, France, 444 p.

REMY J.-C., HEBERT J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *In: Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France*, 63 : 700-710.

REMY J.-C., MARIN-LAFLECHE A., 1974. L'analyse de terre : réalisation d'un programme d'interprétation automatique. *Annales agronomiques*, 25 : 607-632.

REMY J.-C., VIAUX P., 1983. La fertilisation azotée du blé tendre en système intensif en France. *Perspectives agricoles*, 67 : 26-34.

SALETTE J., LEMAIRE G., 1981. Sur la variation de la teneur en azote de graminées fourragères pendant leur croissance : formulation d'une loi de dilution. *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Paris*, 292 : 875-878.

SEBILLOTTE M., 1991. Les règles de la fertilisation azotée. *In: L'azote en question. APRIA, Paris, France*, p. 135-145.

SIBAND P., 1990. Le diagnostic nutritionnel des cultures annuelles. *In: Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales. Montpellier, France, 12-15 septembre 1989*, p. 151-170. IRAT (éd.), CIRAD, Montpellier, France.

SPARLING G.P., ROSS D.J., 1993. Biochemical methods to estimate soil microbial biomass: Current developments and applications. *In: Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. Mulongoy K. and Merckx R. (Eds). IITA, K.U. Leuven. Wiley-Sayce Co-Publication*, p. 21-37.

STANDFORD G., 1982. Assessment of soil nitrogen availability. *In: Stevenson F.J. (Ed) Nitrogen in agricultural soils. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA*, p. 651-688.

STANDFORD G., SMITH S.J., 1972. Nitrogen mineralization potential of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 36: 465-472.

TURCHENEK L.W., OADES J.M., 1979. Fractionation of organo-mineral complexes by sedimentation and density techniques. *Geoderma*, 21: 311-343.

WANEUKEM V., GANRY F., (sous presse). Relations entre les formes d'azote organique du sol et l'azote absorbé par la plante dans un sol ferrallitique du Sénégal. *Cahiers ORSTOM, série pédologie*, 27.

WEHRMANN J., SCHARPF H.C., 1986. The N-min method - an aid to integrating various objectives of nitrogen fertilization. *Z. Pflanzenernahrung Bodenkd.*, 149: 428-440.

WILLIAMS J.R., JONES C.A., DYKE P.T., 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transaction of the ASAE*, 27: 129-144.

Résumé... Abstract... Resumen

L. RUIZ, F. GANRY, V. WANEUKEM, R. OLIVER,
P. SIBAND — **Les indicateurs de la fertilité azotée
des terres en région tropicale semi-aride.**

Cette synthèse résume les principaux acquis de la recherche agronomique concernant l'identification et l'utilisation des indicateurs de fertilité azotée des sols. Les différentes approches sont décrites et séparées en deux types : les démarches explicatives, c'est-à-dire fondées sur la compréhension et la quantification des mécanismes déterminant le cycle de l'azote dans les agrosystèmes, et corrélatives, fondées sur la recherche de relations statistiques entre la fertilité et des indicateurs variés. Les démarches et leurs résultats sont analysés et discutés. A partir de méthodes de mesure chimiques, physiques, biologiques ou isotopiques, la première s'attache à quantifier l'aptitude à la minéralisation de compartiments fonctionnels de la matière organique. La seconde s'appuie sur les essais agronomiques au champ et met en évidence des relations statistiques avec des valeurs issues d'analyses chimiques du végétal ou du sol. A ce jour, aucun des indicateurs de fertilité azotée proposés n'est largement significatif, mais leur complémentarité doit être exploitée et leur modélisation adaptée aux sols des régions semi-arides.

Mots-clés : fertilité, azote, indicateur, zone semi-aride.

L. RUIZ, F. GANRY, V. WANEUKEM, R. OLIVER,
P. SIBAND — **Indicators of nitrogen fertility
in semiarid tropical soils.**

The main agronomic research findings on the identification and use of nitrogen soil fertility indicators are reviewed. The results are described and classified into two types of approaches: explanatory — based on an understanding and quantification of nitrogen cycle mechanisms in agrosystems; and correlative — based on studies of statistical correlations between fertility and various indicators. The results of these different approaches are analysed and discussed. Using chemical, physical, biological and isotopic analysis techniques, the first approach focuses on quantifying the mineralization potential of functional compartments in organic matter. The second approach is based on agricultural field experiments and highlights statistical relationships with results of chemical plant and soil analyses. No generally significant nitrogen soil fertility indicator has been found to date. However, complementary aspects of the current indicators should be utilized, while developing specific indicator models for semiarid region soils.

Keywords: fertility, nitrogen, indicator, semiarid zone.

L. RUIZ, F. GANRY, V. WANEUKEM, R. OLIVER,
P. SIBAND — **Indicadores de la fertilidad nitrogenada
de las tierras en la región tropical semiárida.**

Esta síntesis presenta los principales resultados de la investigación agronómica relativa a la identificación y utilización de los indicadores de fertilidad nitrogenada de los suelos. Se describen los diferentes procedimientos dividiéndolos en dos tipos: los explicativos, es decir los basados en la comprensión y cuantificación de los mecanismos que determinan el ciclo del nitrógeno en los agrosistemas, y los correlativos, basados en la investigación de las relaciones estadísticas entre la fertilidad y los diversos indicadores. También se analizan y comentan los procedimientos y sus resultados. Utilizando métodos de medición químicos, físicos, biológicos o isotópicos, el primer tipo se dedica a cuantificar la aptitud a la mineralización de compartimientos funcionales de la materia orgánica, mientras que el segundo se basa en los ensayos agronómicos en el campo y pone de relieve las relaciones estadísticas con los valores resultantes de análisis químicos del vegetal o del suelo. Hasta la fecha, ninguno de los indicadores de fertilidad nitrogenada propuestos es ampliamente significativo, pero su complementaridad debe ser aprovechada y su modelización adaptada a los suelos de las regiones semiáridas.

Palabras clave: fertilidad, nitrógeno, indicador, zona semiárida.



Gilbert F. Ganry