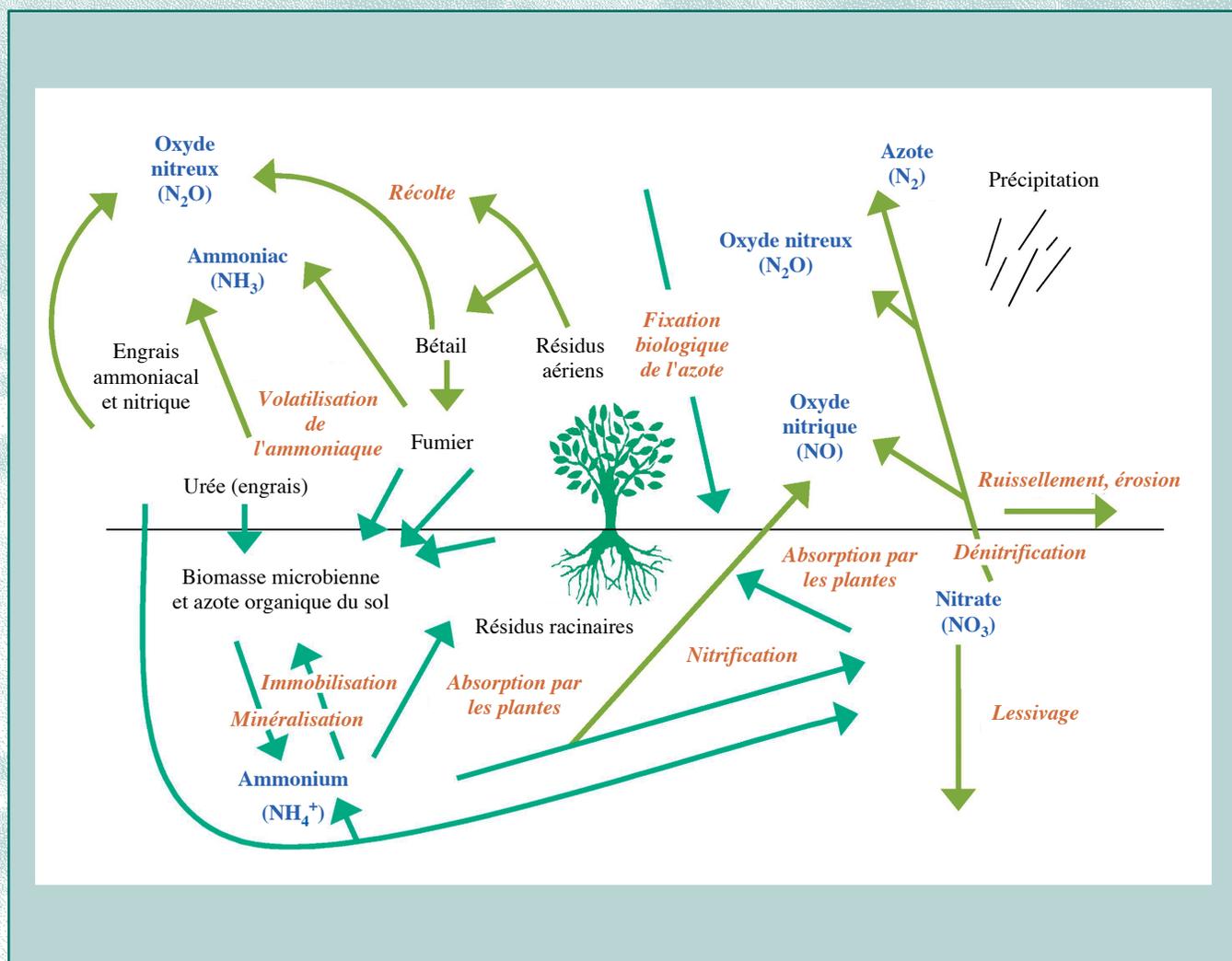


Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol

Approches et méthodologies



GRAPHIQUE DE LA PAGE DE COUVERTURE
Le cycle de l'azote
National soil surface nitrogen balances – explanatory notes.
OECD Secretariat, Paris 2001.

Pour se procurer les publications de la FAO, s'adresser au:

GRUPE DES VENTES ET DE LA COMMERCIALISATION
Division de l'information
Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
Viale delle Terme di Caracalla
00100 Rome, Italie

Courriel: publications-sales@fao.org

Télécopie: (+39) 06 57053360

Site Internet: <http://www.fao.org>

Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol

Approches et méthodologies

BULLETIN FAO
ENGRAIS
ET NUTRITION
VÉGÉTALE

14

préparé par

R.N. Roy

Division de la mise en valeur des terres et des eaux
FAO, Rome

R.V. Misra

Consultant FAO

J.P. Lesschen et

E.M. Smaling

Université de Wageningen
Pays-Bas

Les appellations employées dans ce produit d'information et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture aucune prise de position quant au statut juridique ou au stade de développement des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

ISBN 92-5-205038-8

Tous droits réservés. Les informations contenues dans ce produit d'information peuvent être reproduites ou diffusées à des fins éducatives et non commerciales sans autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur à condition que la source des informations soit clairement indiquée. Ces informations ne peuvent toutefois pas être reproduites pour la revente ou d'autres fins commerciales sans l'autorisation écrite du détenteur des droits d'auteur. Les demandes d'autorisation devront être adressées au:

Chef du Service de la gestion des publications
Division de l'information, FAO
Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie
ou, par courrier électronique, à:
copyright@fao.org

© FAO 2005

Table des matières

Préface	vii
Remerciements	viii
Résumé	ix
Acronymes	x
1. Introduction	1
Contexte spatial et temporel	1
Flux du système et évaluations	2
Les hypothèses – leurs marges de validité et de fiabilité	2
Extrapolation des données et leur validité	3
Facteurs socioéconomiques et leur rôle dans les bilans en éléments nutritifs	3
2. Méthodologies pour évaluer les bilans en éléments nutritifs du sol	5
Niveau macro	5
Etude du bilan en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne, FAO, 1983-2000	5
Les études de bilan en éléments nutritifs en Afrique, l'approche de l'IFDC	12
Bilans nationaux de l'azote du sol, OCDE	18
Evaluation des éléments nutritifs du sol pour la Chine	26
Etude du bilan en éléments nutritifs du sol pour l'Afrique subsaharienne, FAO, 2003	28
Niveau méso	34
Etude du bilan en éléments nutritifs du sol pour la région de Kisii, Kenya	34
Etude du bilan en éléments nutritifs du sol, sud du Mali	37
Etudes de bilan en éléments nutritifs en Inde	40
Etude du bilan en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne, FAO, 2003	42
Niveau micro	44
NUTMON – suivi des éléments nutritifs dans les systèmes agricoles tropicaux	44
Gestion participative des éléments nutritifs dans le sud du Mali	51
Bilans en éléments nutritifs pour la gestion des niches agroécologiques	55
3. Analyse générale	71
Incertitudes	71
Échantillonnage	71
Éléments nutritifs disponibles	72
Données géographiques	73
Extrapolation	73
Impact de l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs	74

4. Conclusions et mises en garde	77
Niveau macro	77
Niveau méso	78
Niveau micro	78
Mises en garde	78
Validation	78
Lacunes	79
Utilité pour les décideurs politiques	79
Présentation des résultats	79
Problèmes spécifiques de l'échelle choisie	80
Bibliographie	81

Liste des tableaux

1. Caractéristiques des systèmes d'exploitation des terres et leurs spécifications	5
2. Intrants et extrants déterminant les flux d'éléments nutritifs dans le sol	6
3. Facteurs de pondération pour les calculs d'engrais minéraux (IN1) selon le SET	6
4. Composition chimique du fumier pour différentes classes eau/terre	7
5. Contribution à la fixation biologique de N des arbres épars et de la fixation non symbiotique	8
6. Dénitrification de 'base' par classe eau/terre	9
7. Composition en éléments nutritifs du sol érodé pour trois niveaux de fertilité du sol	10
8. Bilan moyen en éléments nutritifs de certains pays d'Afrique subsaharienne	12
9. Niveau moyen des bilans en éléments nutritifs (NPK), 1993-95	18
10. Flux des éléments nutritifs entrants et sortants pour les cultures de plein champ en Chine, 1997	28
11. Bilans totaux en éléments nutritifs	33
12. Améliorations de la procédure de calcul par rapport à l'étude de 1990	34
13. Pourcentages de lessivage de N et K en fonction de la pluviométrie et de la teneur en argile	36
14. Bilan en éléments nutritifs des différentes composantes des types d'utilisation des terres	37
15. Bilans en éléments nutritifs calculés pour le sud du Mali	40
16. Bilans en éléments nutritifs de deux régions de culture du cacao au Ghana	44
17. Variables prises en compte pour les calculs de bilan en éléments nutritifs	54
18. Valeurs moyennes utilisées pour les calculs des transferts des éléments nutritifs dans l'environnement	54
19. Bilans en éléments nutritifs des parcelles des trois groupes d'agriculteurs	55
20. Données et méthode de quantification pour les quatre flux entrants utilisés pour le calcul des bilans en N et P	56
21. Données et méthode de quantification pour les cinq flux sortants utilisés pour le calcul des bilans en N et P	57
22. Bilans en éléments nutritifs des exploitations agricoles selon les groupes d'agriculteurs	59
23. Flux d'éléments nutritifs au niveau de l'exploitation agricole	62
24. Bilans en éléments nutritifs des exploitations agricoles de banane	62
25. Bilan en éléments nutritifs des principales cultures	64
26. Bilan en éléments nutritifs et teneur en éléments nutritifs du sol d'un champ de sisal, 1966-1990	66
27. Différences observées entre deux villages au Mali	67
28. Bilans partiels en éléments nutritifs de deux villages au Mali	67
29. Valeurs publiées des flux azotés entrant et sortant des agroécosystèmes rizières fertilisés	68
30. Indicateurs de performance agroécologique pour quatre systèmes agricoles philippins de petites dimensions	69
31. Valeurs approximatives des erreurs relatives des bilans en N et P dans des exploitations agricoles au Pays-Bas	71
32. Estimation des éléments nutritifs disponibles pour chaque flux d'éléments nutritifs	72
33. Aperçu des études de bilan en éléments nutritifs	77

Liste des figures

1.	Flux des éléments nutritifs dans le sol	6
2.	Taux de perte en éléments nutritifs en Afrique subsaharienne, 1983	11
3.	Système géoréférencé d'estimation des besoins et des pertes en éléments nutritifs	13
4.	Le cycle de l'azote	19
5.	Les éléments principaux du bilan en N du sol de l'OCDE	20
6.	Résumé de la structure de la base de données	21
7.	Bilan azoté pour la Chine, 1961-1997	27
8.	Flux global de l'azote pour le Ghana, le Kenya et le Mali	33
9.	Bilan en azote par carré de 1km pour le Ghana	34
10.	Flux d'éléments nutritifs entrant et sortant du système	38
11.	Bilan azoté par culture selon les scénarios probables, optimistes et pessimistes	40
12.	Aperçu de l'approche NUTMON	45
13.	Le concept de l'exploitation agricole utilisé par NUTMON	48
14.	Flux d'éléments nutritifs et flux économiques exerçant une influence sur le bilan en éléments nutritifs et sur le revenu de l'exploitation agricole	49
15.	Processus de la recherche participative d'apprentissage et d'action	52
16.	Exemple d'une carte des flux de ressources	53
17.	Diagramme des flux d'un système intégré théorique agriculture/aquaculture, kg N/ha/an, d'après ECOPATH	68
18.	Carences en éléments nutritifs, au Bangladesh, au cours des années	73
19.	Evolution du rendement et des réserves en éléments nutritifs pour deux types de sol	74

Préface

L'intensification agricole peut représenter une menace à la durabilité de l'agriculture si elle n'est pas couplée à une restauration adéquate de la fertilité des sols. Une évaluation quantitative de l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs des plantes est précieuse afin d'apprécier l'état de la dégradation des sols et de concevoir des mesures correctrices. Les exercices de bilan en éléments nutritifs servent d'indicateurs de durabilité des systèmes agricoles.

Les études de bilan en éléments nutritifs ont utilisé une variété d'approches et de méthodes lors de situations diverses. Cependant, l'information à ce sujet est restée dispersée au sein de nombreuses publications. Afin de répondre à ce problème, la Division de la mise en valeur des terres et des eaux (AGL) de la FAO a organisé une conférence électronique de septembre 2002 à juillet 2003 traitant de «l'Évaluation de l'appauvrissement et des besoins en éléments nutritifs des sols – approche et méthodologie». La conférence électronique a donné l'occasion aux institutions, aux agences et aux scientifiques de partager leurs informations et d'échanger leurs idées, leurs opinions et leurs expériences à cet égard. Un document de base examinant les approches et les méthodologies existantes était à la disposition des participants et a servi de point de départ au débat.

Cette publication est le résultat d'une synthèse du document de base et des contributions à la conférence électronique, ultérieurement consolidée par les analyses et les publications les plus récentes. La publication présente un aperçu de la situation actuelle des études de bilan en éléments nutritifs. Elle fait apparaître l'évolution des différentes approches et méthodologies, offre des comparaisons entre celles-ci, souligne les améliorations effectuées et les questions qu'il nous faut encore couvrir. Elle répartit les études de cas selon différentes catégories aux niveaux macro, méso et micro. Le niveau macro est utilisé pour les niveaux mondial, continental et national des systèmes agricoles. Le niveau méso correspond aux niveaux de la zone agroécologique, provinciale et de la région. Le niveau micro est défini en grande partie comme le niveau de l'exploitation agricole ou du village. Pour chaque cas présenté, l'étude présente les approches méthodologiques, les éléments du bilan en éléments nutritifs et le calcul du flux d'éléments nutritifs. De plus, elle examine les lacunes et les mises en garde qui requièrent une attention particulière.

Il est espéré que cette publication aidera à combler les lacunes scientifiques et apportera une information mise à jour à l'égard des approches et des méthodologies du bilan en éléments nutritifs à l'intention de la communauté scientifique, des agents de vulgarisation de haut niveau, des décideurs, des organisations non gouvernementales et de bien d'autres acteurs impliqués dans le développement agricole.

Remerciements

Ce document a bénéficié des contributions apportées par les participants à la conférence électronique. Qu'ils en soient remerciés. Nos remerciements vont également à MM. R.N. Roy et R.V. Misra qui ont conçu et organisé la conférence et lancé cette étude. Nous remercions MM. J. Poulisse, E.M. Smaling et J.P. Lesschen pour leurs suggestions et contributions. Nous remercions également M^{elle} I. Verbeke et M. W. Burgos León qui ont préparé la version française de ce document.

Résumé

Les exercices de bilan en éléments nutritifs du sol basés sur des systèmes de modélisation statiques et d'extrapolation linéaire sont dépourvus des processus dynamiques et des interactions pourtant réels. Les évaluations méthodologiques sont confrontées à des problèmes tels que la disponibilité limitée des données aux échelles géographiques, les variations géographiques spécifiques d'une échelle concernant les données des apports en éléments nutritifs, la non-linéarité lors de l'extrapolation et le manque de techniques fiables d'extrapolation. L'extrapolation dans le temps des bilans actuels et la garantie de leur validité au cours du temps présentent des problèmes pratiques. Un model/approche davantage fiable et simple, et pouvant s'adapter immédiatement à diverses situations, est nécessaire. En dépit de différentes limitations, les évaluations du bilan en éléments nutritifs déterminent réellement les effets des pratiques agricoles sur la fertilité des sols. De plus, ces estimations apparaissent comme un outil fiable permettant de concevoir des interventions, dans le domaine de la fertilité du sol sur une certaine période, basées sur un cadre cohérent de politiques.

Un projet récemment achevé et dirigé par la FAO «Evaluation de l'ampleur des bilans en éléments nutritifs du sol» ainsi que les discussions entre scientifiques (conférence électronique de la FAO, de septembre 2002 à juillet 2003) ont permis de clarifier les principales questions concernant les approches d'évaluation de bilan en éléments nutritifs. Ces activités pourront également réussir à combler les lacunes méthodologiques. Des perfectionnements méthodologiques sont envisageables dans la mesure où les évaluations peuvent être rendues davantage explicites au niveau géographique (représentant les variations géographiques des sols et du climat) et par le biais de procédures améliorées permettant de calculer les flux d'éléments nutritifs et de quantifier les réserves en éléments nutritifs du sol. L'introduction d'études au niveau méso donne de la valeur aux approches existantes au niveau des exploitations agricoles et nationales. Le niveau méso offre un point de départ approprié aux interventions des politiques.

Bien que les incertitudes liées au niveau macro aient besoin d'être minimisées et les validations améliorées, il risque de ne pas être possible de valider tous les flux d'éléments nutritifs; on peut se concentrer sur les flux considérés comme étant les plus importants. Une approche participative visant à élaborer et valider un ensemble de modèles spécifiques doit être promue. De plus grandes quantités et réserves de données devraient faciliter le perfectionnement des modèles mais aussi les rendre plus utilisables à échelle variable.

Des contrôles sur le terrain peuvent partiellement résoudre certains problèmes liés à la qualité des données, à l'interprétation des cartes, aux différences de résolution et à la validation sur le terrain au niveau macro. De nouvelles techniques, telles que la spectroscopie de réflectance, peuvent apporter une certaine précision, rapidité et facilité lors de l'évaluation des propriétés du sol et des éléments nutritifs. Les images satellitaires classées et les modèles altimétriques digitaux (MADs) peuvent amener des améliorations considérables dans les études des bilans en éléments nutritifs au niveau méso. Les méthodes d'échantillonnage par stratification et l'utilisation des SIGs pour l'extrapolation pourraient contribuer à améliorer les évaluations au niveau méso.

La présentation des résultats de l'évaluation en termes de perte de rendement ou de valeurs monétaires facilite la compréhension des décideurs politiques sur ces questions. La proposition de programmes visant à soutenir les gouvernements nationaux à faire valoir leurs environnements socioéconomiques et politiques pour l'amélioration des sols (dans le but de promouvoir une agriculture davantage rentable et durable) est vivement conseillée.

Acronymes

ASS	Afrique subsaharienne
B	Bore
Ca	Calcium
CEA	Champs écoles d'agriculteurs
CEC	Capacité d'échange cationique
CET	Classes eau/terre
CIRAF	Centre international pour la recherche en agroforesterie
CMDT	Compagnie malienne pour le développement des textiles
ERP	Evaluation rurale participative
ETP	Evapotranspiration potentielle
EUPT	Equation universelle de perte en terre
EUROSTAT	Office statistique des communautés européennes
FBA	Fixation biologique de l'azote
GIEN	Gestion intégrée des éléments nutritifs
IAA	Intégration agriculture-aquaculture
IFDC	Un centre international pour la fertilité des sols et le développement agricole
ILRI	Institution internationale de recherche zootechnique
ISRIC	Centre international de référence et d'information pédologique
K	Potassium
LAPSUS	LandscApe ProcesS modelling at mUltidimensions and Scales
MAD	Modèle altimétrique digital
Mg	Magnésium
Mo	Molybdène
N	Azote
NUTMON	Suivi des éléments nutritifs
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
P	Phosphore
QUEFTS	Evaluation quantitative de la fertilité des sols tropicaux
RPAA	Recherche participative d'apprentissage et d'action
S	Soufre
SET	Système d'exploitation des terres
SIG	Système d'information géographique
TUT	Type d'utilisation des terres
UPP	Unité primaire de production
UR	Unité de redistribution
USP	Unité secondaire de production
UTE	Unité de section de l'exploitation agricole
WISE	Inventaire mondial des potentiels d'émissions du sol
ZAE	Zone agroécologique
Zn	Zinc

Chapitre 1

Introduction

La durabilité de l'agriculture peut être mise en danger si la culture continue n'est pas couplée à l'utilisation de pratiques adéquates de restauration. L'appauvrissement en éléments nutritifs est un aspect principal de la dégradation du sol. La connaissance quantitative de la perte en éléments nutritifs des plantes contribue à comprendre l'état de la dégradation du sol et peut se révéler utile pour concevoir des stratégies de gestion des éléments nutritifs. Les exercices de bilan en éléments nutritifs peuvent servir d'indicateurs permettant d'atteindre la durabilité des systèmes agricoles. Les approches basées sur les bilans en éléments nutritifs ont été très utilisées ces dernières années. Des études ont été entreprises à de nombreux niveaux: parcelle, exploitation agricole, régional, national et continental. L'apparition de nombreux cas d'appauvrissement en éléments nutritifs et de diminution de la fertilité du sol a été signalée.

La plupart des études de bilan en éléments nutritifs offrent des conclusions immédiates, basées sur des exercices s'étalant sur des laps de temps courts et dépendant nécessairement d'un certain nombre d'hypothèses. Toutefois, des questions subsistent en rapport avec la validité de telles hypothèses, leur fiabilité et leur capacité à donner un aperçu des processus dynamiques et à étayer l'extrapolation. De même, il est crucial de savoir si des approches/directions nouvelles, des études et des efforts supplémentaires sont requis et réalisables afin d'augmenter la validité des hypothèses et des conclusions. Des questions ont été soulevées afin de savoir si les bilans en éléments nutritifs offrent l'information nécessaire pour comprendre l'état et la dynamique de la fertilité des sols au sein des systèmes agricoles et si de telles analyses peuvent offrir une direction et un appui à la formulation des politiques en matière de gestion de la fertilité des sols (Scoones et Toulmin, 1998).

CONTEXTE SPATIAL ET TEMPOREL

Les variations dans l'espace et dans le temps des flux et des estimations de bilan en éléments nutritifs sont importantes. Une exploitation agricole est généralement considérée en tant qu'une unité bien que celle-ci soit composée de différents types de sol et système de gestion. Les paysages sont souvent caractérisés par leur diversité en termes d'attributs physiques et de gestion. Des sols, des pentes des versants, des réseaux hydrographiques et des situations agricoles riches en contrastes se croisent au sein de bassins versants individuels. La diversité au niveau du village est également manifeste. Bien que les bilans au niveau de la parcelle puissent être négatifs, principalement à cause de la récolte des produits cultivés, les bilans en éléments nutritifs peuvent s'avérer positifs au niveau du village par exemple grâce à l'apport de fumier. Dans les contextes agropastoraux, la relation entre la culture et la prairie apparaît plus importante. Les tentatives de modélisation de tels systèmes sont chargées de problèmes et de complexités tout spécialement dans le contexte des hypothèses concernant les variables.

La dynamique temporelle est aussi un facteur capital ayant une influence sur les résultats du bilan en éléments nutritifs. Par exemple, les variations dans le temps de la quantité de bétail et de la production de fumier, résultant de la migration ou de développements similaires, peuvent avoir un impact considérable sur divers flux d'éléments nutritifs, y compris sur les intrants par l'utilisation d'engrais et de fumier, mais aussi sur les flux sortants.

Malgré de telles dimensions spatiotemporelles, la plupart des études s'orientent plutôt sur des exercices à «résultat rapide», basés sur des moyennes, et qui ne

peuvent avoir qu'une faible justesse à l'égard de la situation réelle. Par conséquent, l'échantillonnage apparaît capital et nous sommes en proie à un certain nombre de problèmes pour calculer les bilans en éléments nutritifs. Au-delà des facteurs de gestion du sol, l'identification des principaux types de terre, des paysages et de leur variabilité est primordiale à l'obtention d'une procédure fiable d'échantillonnage. Une simple récapitulation des zones couvertes par les principaux types de sol risque de ne pas fournir les caractéristiques de diversité existant au sein des systèmes agricoles.

FLUX DU SYSTÈME ET ÉVALUATIONS

La première étape de la plupart des exercices de bilan en éléments nutritifs, consiste en l'identification des intrants et des extrants clés des différentes sous-composantes d'un système. Les limites du système, ses sous-composantes et les différents flux d'intrants et d'extrants sont définis.

L'étape suivante consiste en l'évaluation des flux d'éléments nutritifs, soit grâce à un mesurage direct, ou par des estimations basées sur des fonctions normalisées et issues d'ouvrages consacrés à ce sujet. Lorsque les données ne sont pas disponibles à une échelle spécifique, celles-ci sont extrapolées d'autres échelles. Les analyses de bilan en éléments nutritifs impliquent de procéder à des exercices de comptabilisation, où les bilans sont calculés par l'addition des totaux de chaque élément nutritif identifié pour l'étude.

LES HYPOTHÈSES – LEURS MARGES DE VALIDITÉ ET DE FIABILITÉ

Les modèles de comptabilité et de bilan en éléments nutritifs doivent s'appuyer sur une série d'hypothèses afin de faire face à la complexité des systèmes d'éléments nutritifs. De nombreux exercices de comptabilisation des éléments nutritifs considèrent les processus de dynamique des sols comme une «boîte noire». Les principales données relatives aux éléments nutritifs entrants et sortants sont généralement sélectionnées et issues des ouvrages consacrés à ce sujet et des statistiques de production. Ces données se rapportent à différents sites, mais ne sont pas toujours représentatives de la zone sélectionnée. Certaines études basent leurs calculs sur des données secondaires découlant de certaines hypothèses. Les sources des données utilisées pour de telles analyses ont différentes limites de confiance.

Les données d'intrants et d'extrants relativement faciles à mesurer sont les flux de matière, tels que les engrais, le fumier, les résidus de récolte et les grains récoltés. Plusieurs variables 'environnementales' contribuant aux calculs des bilans en éléments nutritifs doivent être estimées à partir de la bibliographie secondaire. De manière similaire, les valeurs de l'exportation des éléments nutritifs par le produit récolté sont généralement dérivées de données secondaires en rapport avec les rendements et les teneurs en éléments nutritifs des récoltes. Les plantes révèlent des variations considérables dans leur assimilation d'éléments nutritifs. Celles-ci dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que le climat, les propriétés du sol et les pratiques agricoles. L'exportation des éléments nutritifs sous forme de résidus de culture varie en fonction de leur utilisation, qui diffère d'ailleurs entre les pays et au sein de ceux-ci. Un nombre limité d'études ont examiné le lessivage de l'azote (N) et du potassium (K). Les pertes par lessivage ont été évaluées grâce à la régression multiple. Les pertes gazeuses se rapportent à l'azote et peuvent inclure la dénitrification et la volatilisation. Il n'existe que très peu de données fiables sur la dénitrification et la volatilisation. Les estimations ont été effectuées en utilisant des variables et des régressions multiples. Les processus tels que l'érosion représentent les exportations d'éléments nutritifs du sol les plus importantes.

Pour la saisie des données au niveau du terrain, il peut être envisageable de choisir le mesurage direct de certains flux. Toutefois, à des niveaux plus élevés du système, il ne sera pas possible de mesurer chaque flux d'éléments nutritifs. Bien que des données

primaires ponctuelles puissent exister, des calculs sont exigés pour la généralisation à plus grande échelle. Lorsque les données primaires font défaut, le jugement d'un expert ou la consultation des ouvrages bibliographiques de données d'autres zones géographiques n'offre que de 'meilleures suppositions'.

De nombreux transferts d'éléments nutritifs font l'objet de questions relatives à la quantification et à l'incertitude. Le manque d'exactitude des méthodes peut conduire à de mauvaises évaluations. La détermination précise des différents réservoirs en éléments nutritifs du sol est difficile compte tenu de la nature complexe, dynamique et stochastique des processus de transformation des éléments nutritifs dans le sol. Les modifications de concentration des éléments nutritifs dans le sol au cours du temps peuvent être mesurées afin de se faire une idée de l'ampleur de l'appauvrissement en éléments nutritifs. Cependant, de nombreuses méthodes d'analyse du sol ne révèlent pas facilement un appauvrissement du sol, ceci car, la portion «disponible» extraite est masquée par un approvisionnement issu d'autres réservoirs d'éléments nutritifs, comme il l'a d'ailleurs souvent été remarqué pour K. La disponibilité des données permet seulement d'établir une estimation grossière des taux de modifications en éléments nutritifs. Elles ne permettent pas d'offrir des prévisions à long terme de la concentration en éléments nutritifs. Les prédictions à l'égard des effets de la perte des éléments nutritifs sur la future production agricole sont encore plus difficiles à établir.

EXTRAPOLATION DES DONNÉES ET LEUR VALIDITÉ

Des problèmes apparaissent une fois que l'échelle est amplifiée au niveau régional, national ou continental. L'agrégation des bilans en éléments nutritifs au niveau de la parcelle aboutit à des bilans pour l'exploitation agricole. La complexité croissante au sein de l'exploitation agricole influence négativement la fiabilité des calculs de bilan en éléments nutritifs. De nombreux paramètres introduisent des facteurs porteurs d'incertitude pour le bilan en éléments nutritifs.

L'unité la plus grande pour laquelle les bilans en éléments nutritifs peuvent être quantifiés est le champ. Les échelles spatiales plus étendues peuvent être uniquement traitées par le biais de généralisation et d'agrégations. Les systèmes d'utilisation des terres d'une région sont généralisés au sein d'une typologie ayant une variation définie ou indéfinie. Les agrégations décrivent alors de quelles façons les unités généralisées et 'uniformément' plus grandes sont additionnées pour donner un bilan unique en éléments nutritifs du sol pour la région. L'agrégation est une question délicate car le bilan lui-même est composé de plusieurs paramètres qui sont dans certains cas des résultats d'analyse de régression de paramètres plus fondamentaux. La validation du modèle devient difficile en raison du manque de séries de données indépendantes satisfaisant toutes les exigences.

FACTEURS SOCIOÉCONOMIQUES ET LEUR RÔLE DANS LES BILANS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS

La plupart des discussions ayant trait aux éléments nutritifs du sol ne tiennent pas compte du rôle que les agriculteurs jouent dans la détermination des processus de changement de l'environnement. Parmi les agriculteurs et entre les régions, la valeur relative de la terre, la main-d'œuvre et la dotation en capital au cours du temps peuvent avoir d'importantes implications pour la forme et l'efficacité de tout cycle d'éléments nutritifs au niveau de l'exploitation agricole.

Les déclarations relatives à la diminution de la fertilité du sol doivent faire allusion au contexte en question. Les études visant à intervenir de façon ciblée au niveau de la fertilité du sol doivent utiliser une approche qui distingue l'exploitation agricole de la zone agroécologique (ZAE) et des groupes socioéconomiques. Dans l'éventualité où les aspects socioéconomiques ne seraient pas considérés dans la comptabilisation et le bilan en éléments nutritifs, de nombreux facteurs pertinents seraient alors exclus.

Les études de bilan en éléments nutritifs décrivent les effets de l'agriculture sur la fertilité du sol. Un plan déployé sur une certaine période en vue d'interventions externes et basé sur un cadre cohérent des politiques est exigé pour l'avenir, et se trouve d'ailleurs être la marche à suivre la plus appropriée. Ce plan doit venir en complément d'une approche/modèle facilement adaptable à diverses situations.

Le Chapitre 2 donne un aperçu des études de bilan et d'appauvrissement en éléments nutritifs à diverses échelles. Les cas d'études sont divisés aux niveaux macro, méso et micro et sont classés par ordre chronologique. Les niveaux d'échelle ne sont pas fixés, mais indiquent l'ordre de grandeur. Le niveau macro est utilisé pour le système d'exploitation au niveau mondial, continental et national. Le niveau méso coïncide avec le niveau de la région et de la ZAE. Celui-ci peut également être défini en tant qu'une entité agroéconomique, par exemple des systèmes d'exploitation basés sur le coton ou le lait. Enfin, le niveau micro est défini au niveau de l'exploitation agricole ou du village, mais peut également être étendu au groupe gérant les éléments nutritifs.

Ce rapport ne tente pas de dresser une liste de toutes les études de bilan en éléments nutritifs qui ont eu lieu au cours de ces dernières années. La sélection des cas d'étude est basée sur différentes approches de calcul de bilan en éléments nutritifs et sur leur caractère innovateur. Concernant le niveau micro, plusieurs cas d'étude décrivent une gestion spécifique, où certaines unités de champs/cultures/paysages sont favorisées au détriment d'autres. L'ensemble des cas sélectionnés a été publié dans des journaux internationaux ou des livres. De nombreux livres et journaux offrent davantage d'informations sur les bilans en éléments nutritifs et sur la recherche ayant trait à la fertilité du sol (e.g. Smaling, 1998; Scoones et Toulmin, 1999; Smaling, Oenema et Fresco, 1999; Vanlauwe *et al.*; 2002).

Chapitre 2

Méthodologies pour évaluer les bilans en éléments nutritifs du sol

NIVEAU MACRO

Etude du bilan en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne, FAO, 1983-2000

L'étude évalue l'état d'appauvrissement en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne (ASS) pour l'année 1983 et 2000 (Stoorvogel et Smaling, 1990). Celle-ci fournit des données sur l'exportation nette des macroéléments N, phosphore (P) et K de la couche du sol arable pour chaque pays.

L'élaboration d'une méthode en vue d'accomplir cette évaluation a été la préoccupation principale de cet exercice. La FAO a fourni les chiffres relatifs à la production (1983) et aux projections (2000) par culture et par pays. Ces chiffres ont alors été spécifiés principalement pour six 'classes eau/terre' (CETs) basées sur le climat: zones où la pluviométrie est faible, incertaine et bonne, les zones difficiles, et les zones irriguées et naturellement inondables. L'étape suivante a été de définir et de quantifier les facteurs responsables du flux de N, P et K à l'intérieur et à l'extérieur du sol pour les plus petits constituants de chaque CET: les systèmes d'exploitation des terres (SETs). La dynamique de la fertilité du sol dans un SET est déterminée par cinq flux entrants et cinq flux sortants.

Méthodologie

Des hypothèses ont dû être établies afin de décrire et de quantifier les mécanismes responsables des flux de N, P et K à l'intérieur et à l'extérieur du sol. Ces hypothèses ont constitué la phase cruciale de cet exercice. A cet égard, une décision importante a été de subdiviser les CETs en SETs. Un SET est caractérisé comme une étendue de terrain bien définie assortie de son type d'utilisation des terres (TUT) (FAO, 1976). Cette étude comprend aussi l'hypothèse qu'un SET est une entité homogène.

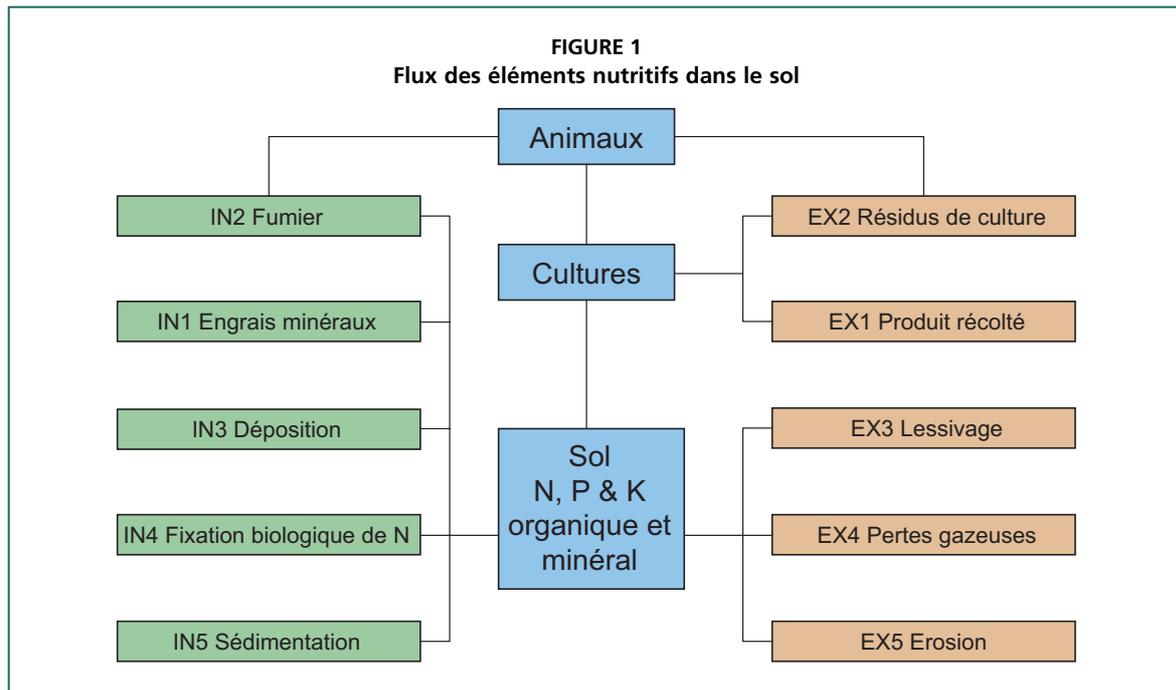
Le tableau 1 donne les caractéristiques de chaque SET. Chaque CET est composée d'un ou de plusieurs SETs. La description de chaque SET s'appuie sur la bibliographie correspondante et est propre à chaque pays.

A chaque analyse, une certaine quantité de N, P et K d'origine organique et minérale est présente dans le sol sous des formes stables ou labiles, utilisables par la plante. En l'intervalle d'une année, les quantités mesurées peuvent donner des résultats différents compte tenu des nombreux processus qui provoquent le transfert des éléments nutritifs au sein et à l'extérieur des couches arables. Les cinq flux entrants et sortants considérés dans cette étude sont indiqués dans le tableau 2 et la figure 1.

Dix facteurs jouent un rôle manifeste à l'enrichissement (IN) ou l'appauvrissement (EX) du sol. Etant donné que le bétail en Afrique se nourrit principalement de résidus

TABLEAU 1
Caractéristiques des systèmes d'exploitation des terres et leurs spécifications

Caractéristiques	Spécifications
Précipitations (P)	Moyenne pour la CET (mm/an)
Fertilité du sol (F)	Classes: 1 – faible; 2 – modérée; 3 – élevée
Niveau de gestion	Distinction entre faible (f) et élevé (E)
Utilisation d'engrais	Facteur de pondération 0-3, connexe à la distribution régionale de la consommation totale nationale
Application de fumier	0, 500, 1 000, 1 500 kg/ha/an ou 'pendant le pâturage'
Exportation des résidus	% des résidus de culture exportés du champ ou brûlés
Erosion	Perte en terre (tonnes/ha/an)
Cultures	Base de données de la FAO



de culture, les deux facteurs IN2 et EX2 peuvent interagir. Par conséquent, une partie des résidus de récolte est exportée provisoirement, afin d'être rapportée ultérieurement sous forme de fumier.

Engrais minéraux (IN1)

La base de données de la FAO détient des informations sur la consommation exacte totale d'engrais par culture et par pays pour 1983 ainsi que des projections pour 2000. Cependant, ces données n'étaient pas indiquées par CETs. Deux situations sont apparues:

1. La bibliographie a donné des données brutes sur la répartition régionale d'engrais au sein d'un pays, auquel cas ces données ont été utilisées.
2. Quand l'information n'était pas disponible, l'hypothèse a été que l'utilisation d'engrais n'était pas répartie uniformément au sein d'un pays, et un facteur de pondération a été attribué à chaque SET, comme indiqué dans le tableau 3.

TABEAU 2
Intrants et extrants déterminant les flux d'éléments nutritifs dans le sol

Intrant	Extrant
IN1 Engrais minéraux	EX1 Produit récolté
IN2 Fumier	EX2 Résidus de culture
IN3 Dépôts	EX3 Lessivage
IN4 Fixation biologique de l'azote	EX4 Pertes gazeuses
IN5 Sédimentation	EX5 Erosion

TABEAU 3
Facteurs de pondération pour les calculs d'engrais minéraux (IN1) selon le SET

Classe eau/terre	Facteur de pondération	
	Gestion faible	Gestion élevée
Faible précipitation (fP)	0,2	0,4
Précipitation incertaine (PI)	0,6	1,2
Bonnes précipitations (BP)	1,0	2,0
Zones difficiles (ZD)	1,0	2,0
Zones naturellement inondables (ZNI)	0,6	1,2
Zones irriguées (ZI)	1,5	3,0

Fumier (IN2)

Bien que l'élevage soit un élément essentiel de l'agriculture africaine, l'étude n'a pas pris en compte le pâturage extensif, seules les terres arables ont été considérées. Cependant, deux formes d'application de fumier sont apparues dans la description des SETs.

- A. Collecte du fumier des bomas, des kraals et d'autres lieux de stockage, et application sur les terres arables préalablement à la plantation (TUT 0, 500, 1 000 ou 1 500 kg/ha).

TABEAU 4
Composition chimique du fumier pour différentes classes eau/terre

Classe eau/terre	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(% de poids frais)		
Faible précipitation, précipitation incertaine, zone irriguée Zone difficile (< 1 200 mm de précipitation par an)	0,48	0,40	0,65
Bonne précipitation, zone naturellement inondable Zone difficile (> 1 200 mm de précipitation par an)	0,42	0,35	0,55

B. Fumure sur place par l'alimentation du bétail avec des résidus de culture (TUT 'pendant le pâturage'; interaction avec EX2).

Afin de calculer A), chaque TUT avec un apport de fumier mais sans pâturage était caractérisé par une des quatre classes, tout en indiquant la quantité appliquée sur les champs. Ces quantités ont été fixées à 0, 500, 1 000 et 1 500 kg de poids frais/ha/an.

Bien que la composition chimique du fumier frais varie beaucoup selon sa nature et sa teneur en eau, celle-ci doit être fixée comme une constante pour les groupes de CETs afin de faciliter le calcul. Le tableau 4 a été élaboré sur la base de l'information disponible dans la littérature.

Pour B), lorsque le bétail se nourrit des résidus de culture abandonnés sur le champ, une partie de l'intrant en fumier se produit 'pendant le pâturage'. Trois questions sont apparues:

1. Quelle est la quantité de résidus de culture broutée ?
2. Combien d'heures par jour les animaux passent-ils sur les pâturages ?
3. Quelle est la quantité d'éléments nutritifs absorbée par les animaux ?

Les réponses ont été les suivantes:

1. Celle-ci est différente pour chaque SET.
2. 12 heures (valeur fixée pour chaque SET).
3. 10 pour cent (valeur fixée pour chaque SET).

Déposition (IN3)

Les processus de dépositions sèches et humides fournissent des quantités importantes d'éléments nutritifs aux sols. En raison d'une répartition irrégulière des données sur le continent, la procédure de calcul a été divisée en deux:

1. Zones sous l'influence de l'Harmattan (Afrique de l'Ouest); la bibliographie offre suffisamment de données ponctuelles pour permettre l'interpolation.
2. Zones en dehors de l'influence de l'Harmattan: les données sont rares, mais il y a une corrélation avec les précipitations; une analyse de régression pour les différents éléments nutritifs ont pour résultat les équations indiquées ci-dessous. Elles ont été utilisées pour calculer la contribution à la fertilité des sols résultant de IN3.

Les calculs ont été:

$$IN3 (N) = 0,14 \times (\text{précipitation})^{1/2}$$

$$IN3 (P_2O_5) = 0,053 \times (\text{précipitation})^{1/2}$$

$$IN3 (K_2O) = 0,11 \times (\text{précipitation})^{1/2}$$

où: IN3 est exprimé en kilogrammes par hectare et par an et les précipitations en millimètres par an.

Fixation biologique de l'azote (IN4)

Une source importante d'azote dans plusieurs systèmes agricoles est l'azote atmosphérique (N₂). Les espèces légumineuses et le riz aquatique puisent de cette source. Sur la base de l'information issue dans les ouvrages consacrés à ce sujet, trois stipulations peuvent être présentées, selon la demande totale en azote des cultures:

TABLEAU 5
Contribution à la fixation biologique de N des arbres
épars et de la fixation non symbiotique

Classe eau/terre	Apport (kg/ha/an)
Faible précipitation	3
Précipitation incertaine	4
Bonnes précipitations	5
Zones difficiles > 1 200 mm précipitation/an	5
< 1 200 mm précipitation/an	2
Zones naturellement inondables	2
Zones irriguées	2

1. Sur la demande totale en azote des cultures légumineuses (soja, arachide et légumes secs), 60 pour cent sont fournis par la fixation symbiotique de N (Rhizobia).
2. Sur la demande totale en azote du riz aquatique (CET, zones irriguées et naturellement inondables), 80 pour cent sont fournis par la fixation autotrophe chimique de N (Azolla, autres algues), jusqu'à un maximum de 30kg/ha/an. Des assimilations plus élevées proviennent de l'azote présent dans le sol.
3. Toutes les cultures bénéficient de l'azote fixé de façon non symbiotique (Azotobacter,

Beijerinckia et Clostridium) ou par les arbres capables de fixer l'azote (Rhizobia et *Actinomyces* spp.). Cette contribution est subdivisée selon les CETs comme indiqué dans le tableau 5.

Sédimentation (IN5)

La sédimentation apparaît dans certains secteurs des zones 'naturellement inondables' de CET. Il n'existe que très peu d'information sur la composition en éléments nutritifs de ce sédiment. Cependant, il a été nécessaire de faire une supposition à l'égard de l'importance revêtue par ce flux entrant. Le groupe d'experts a atteint un consensus sur un bilan en éléments nutritifs en équilibre dans ce CET. Les flux entrants et sortants ont été calculés, mais on a supposé que le déficit (IN5) a été provoqué par les eaux d'inondation et leurs sédiments.

Dans les zones irriguées de CET, la teneur en éléments nutritifs de l'eau d'irrigation a également été considérée comme un flux entrant. Les ouvrages consacrés à ce sujet et les consultations ont mené à l'hypothèse selon laquelle une moyenne de 300 mm/ha/an d'eau d'irrigation est apportée aux terres irriguées. Le calcul de IN5 a alors été déterminé par la concentration des trois macroéléments dans cette quantité d'eau. Les informations existantes à ce sujet ont proposé les valeurs suivantes comme utilisables:

N: 10 kg/ha/an,

P₂O₅: 3 kg/ha/an,

K₂O: 5 kg/ha/an.

Produit récolté (EX1)

Différentes cultures prélèvent diverses quantités d'éléments nutritifs présents dans le sol. Beaucoup de publications sont disponibles à ce sujet. Les valeurs moyennes pour chaque culture ont été préparées. Afin d'obtenir une estimation de EX1, ces données ont dû être associées aux chiffres de production fournis par la FAO.

$$EX1 = \frac{\Sigma (\text{superficie} \times \text{teneur} \times \text{rendement})}{\text{superficie totale}}$$

Résidus de culture (EX2)

Une estimation de la quantité des résidus de culture prélevés du champ arable a été obtenue grâce aux ouvrages consacrés à ce sujet. Il est apparu que les attitudes des agriculteurs vis-à-vis des résidus de culture diffèrent considérablement entre les pays étudiés, mais aussi au sein de ceux-ci. L'exportation réelle est donnée dans la description du SET. L'exportation peut être totale (par exemple utilisée pour le combustible, la couverture ou dans l'industrie) ou incomplète (mise en pâturage ou brûlée). Quand il y a eu pâturage, celui-ci a été indiqué dans la description du SET. IN2 donne un aperçu de l'effet du pâturage sur la fertilité du sol. Les pratiques de brûlage sont difficiles à

décrire à l'échelle continentale. Dans cette étude, on a supposé que seuls les résidus du coton étaient complètement brûlés pour des raisons d'hygiène du champ. L'exportation d'azote et de potassium par brûlis a été calculée dans EX3 et EX4.

Une série complète de données brutes sur l'assimilation des éléments nutritifs par les résidus de récolte à la surface du sol a été préparée. Les valeurs moyennes de la quantité d'éléments nutritifs dans les résidus de récolte par tonne récoltée ont aussi été préparées ainsi que des échelles de valeurs pour plusieurs cultures. Quand les gammes de valeurs étaient indiquées, le niveau général de gestion et la description du SET ont été utilisés. La valeur la plus faible de la gamme (peu d'éléments nutritifs dans les résidus par tonne de produit récolté) indique un niveau élevé de gestion, alors qu'une valeur élevée indique un faible niveau de gestion. Des rapports entre le grain et la paille plus favorables liés à des améliorations génétiques expliquent ces différences. La formule utilisée pour calculer EX2 a été la suivante:

$$EX2 = \frac{\Sigma (\text{superficie} \times \text{teneur} \times \text{rendement})}{\text{superficie totale}} \times \text{facteur d'exportation}$$

Lessivage (EX3)

Le lessivage est un mécanisme important de perte pour certains éléments nutritifs. Dans les sols tropicaux, le phosphore est le plus souvent lié aux particules du sol. Par conséquent, cette étude suppose que le lessivage joue seulement un rôle vis-à-vis de l'azote et du potassium. La recherche sur le lessivage est principalement limitée aux observations ponctuelles, qui ont une répartition irrégulière sur le continent. Ce peu de données ne sont pas suffisantes pour appuyer un modèle qui devrait avoir une signification géographique. Par conséquent, les recherches effectuées à ce sujet ont été examinées abondamment. Ce rapport, de concert avec des consultations d'experts, a offert des indices pour la corrélation. La régression multiple a montré que le lessivage est en corrélation positive avec:

- *P*: précipitations (moyenne annuelle, mm);
- *F*: classe de fertilité du sol (1 - faible; 2 - modérée; 3 - élevée);
- IN1 + IN2: application totale d'engrais et de fumier (spécifique au SET, en kg/ha/an);

et en corrélation négative avec:

- PN, PK: prélèvement total de, respectivement, N et K₂O (spécifique à la culture et au rendement, en kg/ha/an).

Les équations de régression suivantes ont été trouvées (en kilogrammes par hectare et par an):

$$EX3 \text{ (N)} = 2,3 + (0,0021 + 0,0007 \times F) \times P + 0,3 \times (IN1 + IN2) - 0,1 \times PN$$

$$EX3 \text{ (K}_2\text{O)} = 0,6 + (0,0011 + 0,002 \times F) \times P + 0,5 \times (IN1 + IN2) - 0,1 \times PK$$

Pertes gazeuses (EX4)

L'azote est perdu dans l'atmosphère par deux processus: la dénitrification et la volatilisation. La dénitrification se produit sous des conditions anaérobies. Un sol ne doit pas être entièrement saturé pour que la dénitrification se produise. En général, la perte par dénitrification est généralement la plus importante dans les climats humides, sur les sols très fertilisés et argileux, et pour les cultures puisant des quantités relativement faibles d'azote. La volatilisation de l'ammoniaque a principalement un rôle dans les environnements alcalins. Puisque ces sols ne

TABLEAU 6
Dénitrification de 'base' par classe eau/terre

Classe eau/terre	Dénitrification (kg/ha/an)
Faible	3
Incertaine	5
Bonne	8
Zones difficiles > 1 200 mm précipitation	12
< 1 200 mm précipitation	5
Zones naturellement inondables	12
Zones irriguées	11

sont pas fréquents en ASS, la volatilisation et la dénitrification n'ont pas été traitées de manière séparée.

En général, l'information concernant ces deux flux était rare et répartie de façon irrégulière. Par conséquent, des corrélations ont été de nouveau recherchées. Les analyses de régression multiple ont donné les équations suivantes pour le flux extrant (en kilogrammes par hectare et par an):

$$EX4 (N) = \text{«Base»} + 2,5 \times F + 0,3 \times (IN1 + IN2) - 0,1 \times PN$$

où:

«Base»: une valeur constante, englobant l'humidité relative des sols et spécifique des CETs. (tableau 6).

F: classe de fertilité du sol (1 – faible; 2 – modérée; 3 - élevée);

IN1 + IN2: application totale d'engrais et de fumier (spécifique au SET, en kg/ha/an);

PN: prélèvement total de N (spécifique à la culture et au rendement, en kg/ha/an).

Erosion (EX5)

Les résultats de la recherche sur la perte en terre par érosion étaient plutôt bien documentés pour la plupart des pays. Une estimation de la perte en terre sur la base de cette information a été donnée dans la description de chaque SET. Un sol doté d'une fertilité élevée peut perdre davantage qu'un sol pauvre. Le tableau 7 fournit une liste des compositions supposées en éléments nutritifs du sol érodé pour trois classes de fertilité du sol. Ces classes sont indiquées dans la description du SET et ont également été utilisées pour évaluer EX3 (lessivage) et EX4 (pertes gazeuses).

L'évaluation de la teneur en éléments nutritifs dans le sol érodé a été la tâche la plus difficile. Sur la base de la bibliographie existante, un 'facteur d'enrichissement' a été déterminé. Comme les particules les plus fines du sol sont les premières à être délogées au cours de l'érosion, le sol érodé a tendance à contenir davantage d'éléments nutritifs que le sol d'origine. Dans l'étude, le facteur d'enrichissement a été fixé à 2 pour N, P et K, impliquant un rapport de deux entre la teneur en éléments nutritifs du sol érodé et la teneur en éléments nutritifs du sol d'origine.

Comme la couche arable s'érode, les racines des cultures commencent à pénétrer dans les couches qui étaient auparavant sous-jacentes à la zone des racines. Par conséquent, une partie de ce qui est perdu à la surface profite aux couches plus inférieures. Les implications sont telles que les pertes calculées en phosphore et potassium par l'érosion sont partiellement compensées par la prolongation vers le bas de la zone des racines. Les contributions ont été fixées à 25 pour cent des pertes calculées pour les deux éléments.

Taux d'exploitation

La base de données de la FAO donne les superficies des terres récoltées et des terres arables pour chaque CET. Le rapport entre les deux, exprimé en pourcentage, est appelé le 'taux d'exploitation' (TE). Lorsque ce rapport était inférieur à 100 pour cent, une partie de la terre arable a été considérée en jachère. Sa superficie a été calculée ainsi:

$$\text{Superficie de jachère} = ((100/TE) - 1) \times \text{superficie récoltée (ha)}$$

TABLEAU 7
Composition en éléments nutritifs du sol érodé pour trois niveaux de fertilité du sol

Classe de fertilité du sol	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	(%)		
1	0,05	0,02	0,05
2	0,1	0,05	0,1
3	0,2	0,1	0,2

Au cours d'une période de jachère, une accumulation progressive d'éléments nutritifs a lieu. IN3, IN4 et IN5 contribuent à la fertilité du sol. De plus, une partie des éléments nutritifs assimilables par les plantes est retenue dans la biomasse de la jachère au lieu d'être lessivée ou érodée. Durant les années de jachère, alors que les processus continuels de dégradation et

minéralisation n'augmentent pas la quantité totale des éléments nutritifs du sol, les réservoirs labiles d'éléments nutritifs sont pourtant reconstitués.

Par contre, les espèces ligneuses des jachères sont souvent utilisées comme source de combustible ou vendues sur place (EX1), les éléments nutritifs de la jachère sont partiellement exportés par les animaux en pâture qui ne rendent pas l'ensemble de ce qui a été assimilé (EX2-IN2), et les pratiques de brûlis préalablement à la mise en culture augmentent fortement les processus de pertes (EX3-EX5). De plus, les intrants additionnels en Afrique de l'Ouest à travers la déposition de poussière (IN3) sont compensés par les extrants supplémentaires en raison de la rareté du bois de chauffe (EX1).

Ces considérations, couplées aux ouvrages consacrés à ce sujet et aux consultations d'experts, ont permis de déterminer les intrants en éléments nutritifs issus de la jachère comme des valeurs fixes de 2 kg/ha/an pour N, 2 kg/ha/an pour P_2O_5 , et 1 kg/ha/an pour K_2O quel que soit le SET. Lorsque le taux d'exploitation était de 100 pour cent, la superficie de la terre en jachère a été fixée à 0 ha. Dans l'éventualité où le taux d'exploitation était supérieur à 100 pour cent, des cultures successives avaient lieu et il a été supposé qu'il n'y avait pas de jachère. Dans ce cas, les zones récoltées et les rendements des cultures annuelles ont été adaptés afin que la superficie totale soit égale à la zone arable et que la production totale reste inchangée.

Résultats

Les résultats de cette étude ont donné les bilans en éléments nutritifs par système d'exploitation des terres et par pays. Ils ont révélé une tendance générale à la baisse de la fertilité du sol en Afrique. Les pays très peuplés et vallonnés de la zone de la vallée du Rift (Kenya, Ethiopie, Rwanda et Malawi) ont eu les valeurs les plus négatives (figure 2), en raison des rapports élevés entre les 'terres cultivées' et les 'terres totales arables', et des rendements de culture et d'une érosion élevés. Pour l'ASS tout entière, les bilans en éléments nutritifs ont été de -22 kg/ha en 1983 et -26 kg/ha en 2000 pour N; -2,5 kg/ha en 1983 et -3 en 2000 pour P; et -15 kg/ha en 1983 et -19 kg/ha en 2000 pour K. Le tableau 8 indique les bilans en éléments nutritifs de plusieurs pays d'ASS. Les prévisions pour 2000 indiquaient un bilan en éléments nutritifs encore plus négatif pour presque l'ensemble des pays. Ceci était influencé par des estimations optimistes de la FAO à l'égard de la production agricole en 2000 (EX1 élevé) et de la diminution attendue des zones de jachère en 2000.

Analyse

A la suite des travaux préliminaires de Pieri (1985), cette étude a été la première à avoir un bilan en éléments nutritifs clairement défini et des flux d'éléments nutritifs évalués avec précision. Celle-ci a créé les fondements de la plupart des études sur le bilan en éléments nutritifs qui ont suivi. Le bilan en éléments nutritifs de cinq flux entrants et sortants a constitué un point de départ largement utilisé. Cependant, d'autres travaux disposant de données et d'objectifs différents ont modifié le calcul de certains flux.

FIGURE 2
Taux de perte en éléments nutritifs en Afrique subsaharienne, 1983

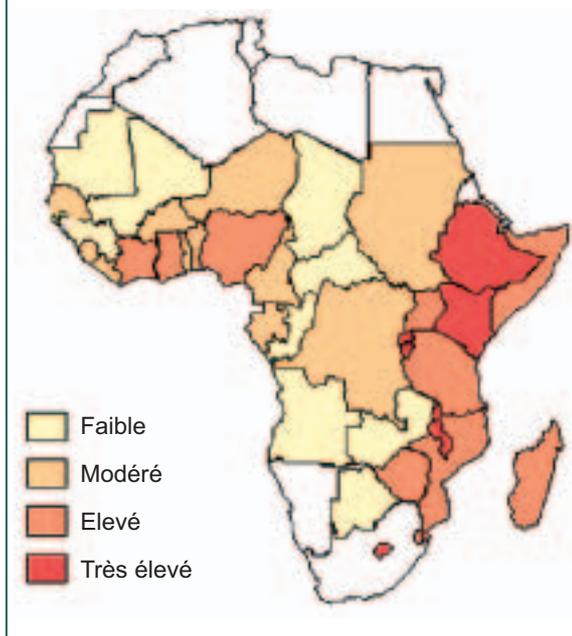


TABLEAU 8
Bilan moyen en éléments nutritifs de certains pays d'Afrique subsaharienne

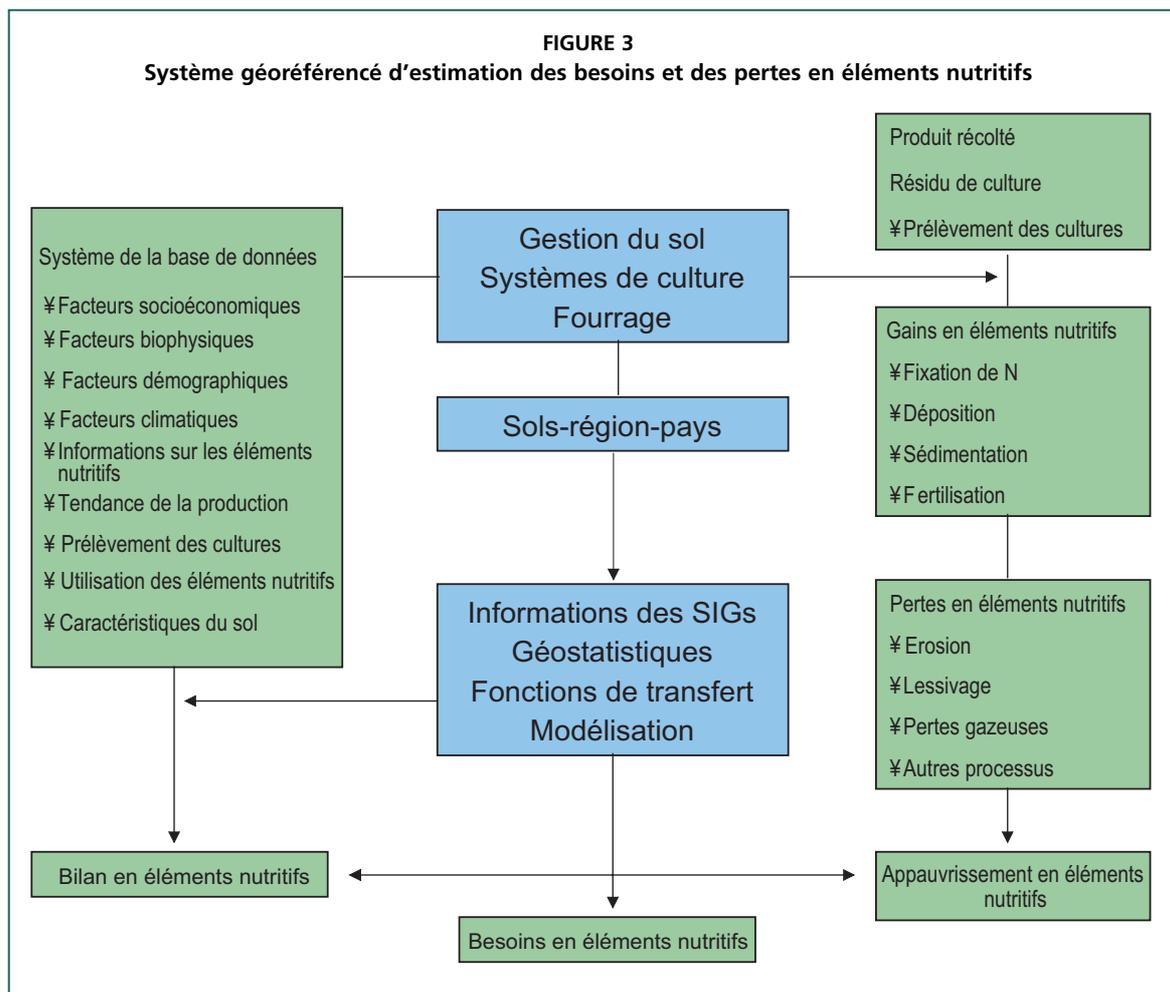
Pays	N		P		K	
	1982-84	2000	1982-84	2000	1982-84	2000
	(kg/ha/an)					
Bénin	-14	-16	-1	-2	-9	-11
Botswana	0	-2	1	0	0	-2
Cameroun	-20	-21	-2	-2	-12	-13
Ethiopie	-41	-47	-6	-7	-26	-32
Ghana	-30	-35	-3	-4	-17	-20
Kenya	-42	-46	-3	-1	-29	-36
Malawi	-68	-67	-10	-10	-44	-48
Mali	-8	-11	-1	-2	-7	-10
Nigeria	-34	-37	-4	-4	-24	-31
Rwanda	-54	-60	-9	-11	-47	-61
Sénégal	-12	-16	-2	-2	-10	-14
République-Unie de Tanzanie	-27	-32	-4	-5	-18	-21
Zimbabwe	-31	-27	-2	2	-22	-26

Les études de bilan en éléments nutritifs en Afrique, l'approche de l'IFDC

L'approche méthodologique utilisée par le Centre International pour la fertilité des sols et le développement agricole (IFDC) afin d'estimer les bilans, les taux de pertes et les besoins en éléments nutritifs, associe les informations sur la production agricole, les caractéristiques du sol et les contraintes biophysiques à l'aide de méthodes et de procédures conçues pour établir de telles estimations (Henao et Baanante, 1999). Les informations et les données liées à la production agricole incluent l'utilisation des terres, la capacité de charge démographique des terres, la production des cultures et l'utilisation d'engrais minéraux et organiques. L'approche utilise des caractéristiques et des systèmes de base de données géographiques conjointement avec des modèles empiriques afin de générer des informations pour les analyses et le suivi.

L'approche se base sur de précédentes études de bilans en éléments nutritifs (Stoorvogel et Smaling, 1990; Smaling et Fresco, 1993; Smaling, Stoorvogel et Windmeijer, 1993). L'approche tire parti des travaux passés et implique de lier des méthodes et des procédures afin d'estimer les bilans en éléments nutritifs avec des bases de données et des Systèmes d'Information Géographique (SIGs). Elle combine les données et les informations de la base de données géographique, et illustre sous forme de cartes et de graphiques des estimations de bilans en éléments nutritifs et de taux de perte des sols en éléments nutritifs des terres agricoles aux niveaux régional et du pays. La figure 3 représente schématiquement l'approche utilisée pour intégrer les diverses composantes au sein du système géographique afin d'estimer les pertes et les besoins en éléments nutritifs.

Les données descriptives incluent les superficies des cultures et les niveaux de production, ainsi que le prélèvement d'éléments nutritifs de 10 groupes de cultures, qui incluent 90 cultures industrielles et vivrières importantes. Les cultures comprises dans la base de données représentent environ 95 pour cent du total des zones cultivées d'Afrique. Les taux de prélèvement de N, P et K de chaque culture sont estimés par le biais des données recueillies par les études de terrain. La base de données comprend des données de série chronologique sur la production et la superficie des cultures pour la période s'étalant de 1961-1995 (FAO, 1994) et sur la consommation en engrais minéraux par pays et par région entre 1985 et 1995. Les informations touchant aux pratiques et à l'utilisation des engrais minéraux constituent également une composante de la base de données. Ces données, associées aux informations relatives aux systèmes de gestion du sol et des cultures, aux contraintes liées au sol, aux caractéristiques du sol et au climat par région et pays, ont été assemblées au sein du système de gestion de la base de données.



Méthodologie

Une détermination simple du bilan en éléments nutritifs (N, P et K) des sols des écosystèmes agricoles à l'échelle régionale ou du pays est donnée par l'équation suivante:

$$Rn_{tn} = \sum^m (AP_t + AR_{\Delta t} - RM_{\Delta t} - L_{\Delta t}) \quad (1)$$

où: Rn_{tn} est la quantité d'éléments nutritifs d'origine organique et minérale restant dans le sol à l'instant tn ; AP_t est la quantité d'éléments nutritifs d'origine organique et minérale présente dans le sol à l'instant t ; $AR_{\Delta t}$ est la quantité d'éléments nutritifs d'origine organique et minérale ajoutée ou rendue au sol pendant l'intervalle de temps Δt . $RM_{\Delta t}$ est l'estimation des éléments nutritifs exportés par le produit récolté et les résidus de récolte pendant l'intervalle de temps Δt , et $L_{\Delta t}$ est la quantité d'éléments nutritifs perdus au cours de l'intervalle de temps Δt . La valeur t représente le début de la période de temps, tn la fin de cette période et Δt l'intervalle de temps entre t et tn .

L'équation 1 spécifie que si les quantités d'éléments nutritifs exportés du sol (flux sortant) sont supérieures aux apports (flux entrant) soit par fertilisation ou par des pratiques de gestion, les réserves ou les stocks d'éléments nutritifs du sol diminuent. Une détermination exacte des différents réservoirs d'éléments nutritifs du sol est difficile en raison de la dynamique complexe et de la nature stochastique des processus de transformation des éléments nutritifs dans le sol.

La production agricole et les résidus de culture sont utilisés pour calculer le prélèvement des éléments nutritifs par les cultures. L'appauvrissement et les besoins en éléments nutritifs sont évalués par l'utilisation et le calcul des estimations relatives aux gains en éléments nutritifs imputables à l'application des engrais minéraux et

organiques et aux processus biophysiques de déposition, de sédimentation et de fixation. Les informations relatives au climat, aux contraintes, aux caractéristiques du sol et aux ZAEs sont utilisées pour estimer les pertes en éléments nutritifs issues de l'érosion, du lessivage et de la volatilisation (pertes gazeuses). Les estimations des pertes et des gains en éléments nutritifs sont élaborées sur la base de fonctions supposées de transfert d'éléments nutritifs dans le sol et d'estimations de modèles statistiques empiriques.

Les modèles empiriques de perte en éléments nutritifs et les fonctions de transfert sont estimés et utilisés pour calculer l'exportation et évaluer les pertes d'éléments nutritifs. Davantage de recherche dans ce domaine et des améliorations de la qualité des données devraient améliorer la fiabilité de ces modèles. Les caractéristiques et l'estimation de ces modèles sont décrites ci-dessous.

Produit récolté (Np)

La récolte des produits cultivés et l'exportation des résidus de récolte sont les mécanismes principaux d'exportation des éléments nutritifs. Les valeurs moyennes de N, P_2O_5 et K_2O ont été obtenues sur la base des ouvrages dédiés à ce sujet et des données expérimentales. Le prélèvement des éléments nutritifs (Np) d'un produit récolté j d'un pays i a été calculé en multipliant la production totale de la culture (Cp_{ij}) par l'indice de prélèvement des éléments nutritifs d'une culture (IN_j), exprimé en kilogrammes par tonne:

$$Np_{ij} = Cp_{ij}(IN_j) \quad (2)$$

Les valeurs des indices de prélèvement des éléments nutritifs d'une culture (IN_j) découlent des résultats expérimentaux et de la bibliographie existante. Ces indices ont été estimés pour les rendements des variétés traditionnelles et améliorées sous des conditions moyennes de gestion.

Résidus de culture (Nr)

Les indices de teneur en N, P_2O_5 et K_2O des résidus de culture ont été obtenus grâce à certaines références et études sur le terrain. Les éléments nutritifs exportés du sol par les résidus de récolte ont été calculés en multipliant la teneur en élément nutritif du résidu (NI) par les données de production de la culture (Cp) pour les pays et régions, par l'indice de récolte (IR) et par le pourcentage approximatif de résidus laissés sur le sol à la suite de la récolte (Ref). Par conséquent, la quantité du prélèvement d'éléments nutritifs dans les résidus exportés du sol pour une culture donnée (j) dans un pays/région (i) est déterminée par:

$$Nr_{ij} = Cp_{ij} (1-IR_j) NI_j Ref_j \quad (3)$$

où Nr_{ij} représente le prélèvement des éléments nutritifs des résidus de culture, en tonnes ou kilogrammes par hectare, en fonction des valeurs de production agricole. Les estimations de la quantité laissée sur le sol après la récolte et le pâturage ont été obtenues des ouvrages et des rapports par pays. L'indice de récolte (IR) indique la proportion de la partie économiquement produite de la biomasse qui est réellement récoltée.

Lessivage des éléments nutritifs (Nl)

La plupart des ouvrages dédiés au lessivage des éléments nutritifs se limitent aux informations ayant trait aux observations ponctuelles de N et K, qui sont variables et difficiles à extrapoler. Les ouvrages bibliographiques révèlent que le lessivage de N peut être prédit avec exactitude dans un environnement africain sur la base de l'information relative aux précipitations, au pourcentage en humidité du sol et à la teneur en éléments nutritifs du sol. Les modèles de régression ont été estimés afin de prédire le lessivage des éléments nutritifs aux niveaux des pays et des régions. Les caractéristiques générales de ce modèle incluent les variables suivantes: la fertilité des sols exprimée en tant que

classe de fertilité du sol (F_c), les précipitations moyennes (P) pour la région/le site, et les éléments nutritifs appliqués (C_n). Le modèle a été déterminé comme suit:

$$NL_i = \alpha + (\beta_1 + \beta_2 P) F_c + \beta_3 \log(P) + \beta_4 C_n + \epsilon_i \quad (4)$$

où: $100 < P < 3\,300$; NL_i est la quantité de N ou K lessivée sur le site, exprimée en pourcentage de la quantité appliquée; les estimations des paramètres α , β_1 , β_2 , β_3 et β_4 mesurent respectivement les effets de la gestion du site, la classe de fertilité du sol (F_c), les précipitations (P), et les éléments nutritifs appliqués sous forme d'engrais minéraux et organiques (C_n). La classe de fertilité du sol F_c est intégrée au modèle afin de représenter la fertilité et la gestion du sol. Celle-ci est globalement estimée ainsi: 1 = faible; 2 = modérée; 3 = élevée. Le paramètre ϵ_i représente l'erreur associée à l'estimation du modèle.

Pertes gazeuses en Azote (Ng)

Les données expérimentales ont été utilisées pour prévoir la dénitrification des sols kenyans. Les pertes en azote par la volatilisation de l'ammoniaque peuvent également se produire dans les zones tropicales lors d'une utilisation importante d'engrais et de sources organiques de N. De telles pertes sont principalement influencées par: la texture du sol, le pH et les facteurs climatiques. Les pertes en éléments nutritifs à travers ces deux mécanismes sont incluses lors du calcul des bilans en azote. Un modèle a été déterminé afin de prévoir ces pertes azotées. Ce modèle inclut comme variable: les précipitations, la classe de fertilité du sol qui représente les caractéristiques du sol, et la quantité d'éléments nutritifs appliquée qui est conçue comme une mesure de la disponibilité en azote. Le modèle utilisé a la même forme que l'équation 4. Les pertes azotées du modèle sont calculées en pourcentage du prélèvement total d'azote. Les estimations des paramètres α , β_1 , β_2 , β_3 et β_4 ont une interprétation et une signification identiques à celles de l'équation 4 mais, dans ce cas de figure, s'attachent au calcul des pertes azotées (Ng).

Erosion du sol (Ne)

D'amples informations sont disponibles dans de nombreux ouvrages sur la quantité de sol érodé par l'eau pour différents types de sol et de zones d'Afrique. De nombreux facteurs interagissent sur la détermination de la quantité de perte en terre se produisant à un instant et à un lieu donné. L'Equation universelle de perte en terre (EUPT) donne les effets des facteurs les plus importants (Wischmeier et Smith, 1978). Les estimations de l'érosion du sol ont été obtenues par l'utilisation de l'EUPT et des données disponibles. Ce modèle évalue l'érosion du sol en tonnes par acre et par an en fonction de: l'indice d'érosivité par l'eau de pluie, le facteur d'érodibilité du sol, les facteurs topographiques de longueur et d'inclinaison de la pente et le facteur de gestion des cultures et du couvert végétal. Le facteur de gestion et le système des cultures incluent: les effets des cultures et de leurs séquences, les méthodes de travail du sol et l'interaction entre ces facteurs et le calendrier des précipitations au cours de l'année.

Le vent et l'eau peuvent transporter le sol. L'érosion par le vent est visible dans les zones sèches de l'Afrique (du nord et subsaharienne). Des équations empiriques ont été dérivées afin d'estimer l'érosion du sol causée par le vent. Ces équations exigent des données sur la vitesse du vent, les précipitations et des indices d'humidité (Lal, 1985; FAO, 1976). Des relations générales fonctionnelles entre les facteurs qui ont une incidence sur l'érosion éolienne ont été intégrées à l'équation d'érosion par le vent. Cette équation indique la perte en terre, exprimée en tonnes par acre et par an en fonction: de l'indice d'érodibilité du sol, du facteur de rugosité du billon, du facteur climatique, de la longueur du champ érodé le long de la direction par le vent dominant et d'un indice de couverture végétale.

Lorsque des informations fiables sont disponibles, des estimations de l'érosion du sol par l'eau peuvent être dérivées des modèles de perte en terre par érosion.

Cependant, pour cette étude, très peu de données ont été disponibles permettant d'utiliser l'équation éolienne ou d'estimer l'érosion du sol par le vent. Les valeurs d'enrichissements (éléments nutritifs adsorbés sur les particules du sol) ont été utilisées à partir de modèles empiriques et de table de références afin de convertir les pertes en terre par érosion en pertes en éléments nutritifs. Les estimations des pertes en éléments nutritifs dues à l'érosion ont été obtenues aux niveaux régional et national par l'intermédiaire du modèle de fonction de régression suivant (Ne):

$$Ne_i = \alpha + \delta_1 + \delta_2 + \beta_1 Fc + (\beta_2 + (\beta_3 Fc) Cn + \epsilon_i \quad (5)$$

où: Ne_i représente le pourcentage d'éléments nutritifs perdu par l'érosion du sol pour la culture/région sélectionnée; et α , δ_1 et δ_2 sont les paramètres responsables de mesurer les effets des facteurs qui ne sont pas inclus dans le modèle mais qui caractérisent respectivement les régions soudano-sahéliennes, humides et subhumides. Les paramètres β_1 , β_2 et β_3 mesurent les effets de la classe de fertilité du sol (Fc) et de la quantité d'éléments nutritifs d'origine organique et minérale appliquée lors de chaque campagne agricole sur la quantité d'éléments nutritifs qui ont été sujets à l'érosion. La variable ϵ_i représente l'erreur.

Evaluation de l'apport et des flux d'éléments nutritifs

Afin d'évaluer l'utilisation des engrais minéraux (Mf), des renseignements sur les applications d'éléments nutritifs par pays en tonnes de N, P_2O_5 et K_2O ont été obtenus de la base de données de la FAO (FAO, 1996). Des facteurs de pondération et des programmes de SIG ont été utilisés pour calculer la consommation d'engrais à des niveaux élevés d'agrégation (région, classe de sol, classe d'utilisation des terres, ZAEs, etc.).

Les données nécessaires pour calculer les éléments nutritifs d'origine organique (Of) (principalement sous la forme de fumier animal) comprennent: l'effectif de bétail, la quantité de fumier utilisée sur les terres arables et la teneur en éléments nutritifs du fumier au moment de son application. Cependant, des informations supplémentaires sont nécessaires afin d'estimer le recyclage des déchets ménagers et industriels.

Les informations issues des ouvrages scientifiques sur les types de fumier et de produits organiques, sur les doses appliquées par les agriculteurs et sur les pratiques de production animale, ont été utilisées afin d'estimer les apports en éléments nutritifs provenant de l'utilisation d'engrais organiques.

Des estimations au niveau national de la quantité d'éléments nutritifs restituée au sol sous forme de fumier ont été calculées sur la base de la quantité des résidus laissée sur le champ pâturé, de la teneur en éléments nutritifs du résidu, et des éléments nutritifs du résidu qui ont été assimilés par l'animal. Cette dernière, utilisée dans les estimations présentées dans cette publication, était de 10 pour cent.

Les quantités d'éléments nutritifs qui sont restituées au sol par déposition (Nd) sont difficiles à quantifier. La déposition est principalement associée aux niveaux d'éléments nutritifs utilisés (et produits) et à la pluviométrie. Les dépositions sèches et humides ont été évaluées, pour une série de sites sélectionnés, en utilisant les fonctions de transfert. Un modèle a été estimé en s'appuyant sur des formes de fonctions empiriques issues d'autres études (Stoorvogel et Smaling, 1990; Smaling et Fresco, 1993). Dans ces études, la déposition en éléments nutritifs est déterminée en fonction de la racine carrée des précipitations moyennes annuelles. Par conséquent, le modèle suivant a été estimé:

$$Nd_i = \alpha + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \beta_1 Fc + (\beta_2 (P)^{1/2} + \epsilon_i \quad (6)$$

où: Nd_i est la déposition en éléments nutritifs exprimée en pourcentage des éléments nutritifs totaux; α , δ_1 , δ_2 et δ_3 sont des paramètres de variables discrètes intégrées au modèle pour représenter la variabilité due aux facteurs régionaux; β_1 est le paramètre mesurant l'effet de la fertilité du sol sur la déposition des éléments nutritifs; β_2 est le paramètre mesurant l'effet des précipitations sur la déposition des éléments nutritifs et ϵ_i représente l'erreur.

Le mécanisme relatif à l'apport en éléments nutritifs dû à la sédimentation (N_s) est particulièrement important dans les zones irriguées et sur les sols naturellement inondables. Le manque d'informations sur la teneur en éléments nutritifs des sédiments rend difficile toute quantification. En raison de cette limitation, les valeurs en kilogramme par hectare et par an d'éléments nutritifs dans les eaux d'irrigation ont été utilisées pour des régions et des systèmes de culture sélectionnés.

Concernant les apports azotés résultant de la fixation d'azote, les informations bibliographiques relatives au type d'assimilation de l'azote par les cultures ont été utilisées pour identifier trois scénarios de base déterminés par la nature du prélèvement en N par les cultures:

- Environ 60 pour cent du prélèvement total en N par les cultures légumineuses (soja, arachide et légumes secs) se fait par le biais de la fixation symbiotique de N.
- Environ 80 pour cent de la demande totale en N du riz aquatique, jusqu'à un maximum de 30 kg/ha/an, se fait par le biais de la fixation autotrophe chimique de N.
- Toutes les cultures exploitent l'azote fixé de façon non symbiotique ou par les arbres qui sont laissés sur les champs et capables de fixer l'azote. Les contributions de la fixation non symbiotique aux besoins en azote des cultures sont négligeables dans les régions arides et semi-arides. La fixation de l'azote par les arbres a été estimée à 2-10 kg/ha, dont environ 25 pour cent devrait être restitué au sol.

Evaluation de l'appauvrissement et des besoins en éléments nutritifs

L'appauvrissement en éléments nutritifs est estimé par la différence entre la quantité exportée annuellement des champs cultivés et la quantité ajoutée ou importée annuellement sous forme d'engrais, de fumier, de fixation et de processus physiques de déposition et de sédimentation. Le bilan des flux d'éléments nutritifs entrants et sortants (Nb_i) par an ou l'appauvrissement en éléments nutritifs en kilogrammes par hectare pour un pays (i) et une culture (j) est évalué et estimé comme suit:

$$Nb_i = \sum_{ij} (Mf_{ij}, Of_{ij}, Nf_{ij}) + \sum_i (Nd_i, Ns_i) - (\sum_{ij} (Np_{ij}, Nr_{ij}) + \sum_i (Nl_i, Ng_i, Ne_i)) \quad (7)$$

Le calcul des besoins en éléments nutritifs est précisé ainsi:

$$Nur_i = \sum_{ij} (Cp_{ij}) (IN_j) + \sum_{ij} Nr_{ij} + \sum_i (Nl_i, Ng_i, Ne_i) \quad (8)$$

Le besoin en éléments nutritifs (Nur_i) est calculé comme la quantité d'éléments nutritifs à prélever pour atteindre un rendement précis sans pour autant épuiser les éléments nutritifs contenus dans le sol. Ces besoins représentent les exigences minimales. Une culture pourrait extraire davantage que le Nur_i et donner une production ou un rendement meilleurs ou une meilleure qualité de produit. Afin d'estimer la quantité d'engrais nécessaire, le besoin en éléments nutritifs a été adapté afin de représenter correctement la quantité d'éléments nutritifs provenant de l'engrais réellement assimilé par la culture (efficacité de l'utilisation des engrais).

Les taux moyens d'appauvrissement en éléments nutritifs et les besoins en éléments nutritifs ont été initialement estimés à grande échelle pour chaque pays de l'Afrique. En raison des variabilités considérables entre les pays, des estimations ont été faites pour des zones sélectionnées de pays par le biais de fonctions de transfert complexes, de modèles de réponse empiriques et de programmes géostatistiques.

Résultats

Les taux d'appauvrissement en éléments nutritifs ont été calculés pour tous les pays africains (tableau 9). Les bilans ont été négatifs pour tous les pays hormis la République de Maurice, La Réunion et la Jamahiriya arabe libyenne. Le bilan en éléments nutritifs a varié de -14 kg NPK/ha/an pour l'Afrique du Sud à -136 kg NPK/ha/an pour le Rwanda. Les pertes en N et K ont été essentiellement associées au lessivage, à l'érosion du sol et au faible recyclage des résidus de culture. Les pertes en P ont été liées principalement à l'érosion des sols.

TABLEAU 9
Niveau moyen des bilans en éléments nutritifs (NPK), 1993-95

Elevé (> 60)		Moyen (30-60)	Modéré/faible (< 30)
(kg NPK/ha/an)			
Burkina Faso	Mali	Bénin	Algérie
Burundi	Mozambique	Cap-Vert	Angola
Cameroun	Nigeria	République Centrafricaine	Botswana
Côte d'Ivoire	Rwanda	Tchad	Egypte
Rép. Dém. du Congo	Sénégal	Congo	Maroc
Ethiopie	Somalie	Guinée Equatoriale	Afrique du Sud
Gambie	Swaziland	Gabon	Tunisie
Ghana	Ouganda	Lesotho	Zambie
Guinée	République Unie de Tanzanie	Mauritanie	
Guinée-Bissau		Niger	
Kenya		Sierra Leone	
Liberia		Soudan	
Madagascar		Togo	
Malawi		Zimbabwe	

Analyse

L'approche méthodologique de l'étude de Henao et Baanante (1999) est basée sur celle de Stoorvogel et Smaling (1990). Les flux d'éléments nutritifs utilisés étaient identiques et les calculs des flux similaires, bien que des notations différentes aient été utilisées. L'aspect innovateur de cette étude est le lien avec la base de données et le système SIG, qui permet de rendre les calculs de bilan en éléments nutritifs plus aisés et rapides. Des calculs peuvent être préparés pour chaque année car les données sont uniquement issues de FAOSTAT et des cartes SIG, alors que Stoorvogel et Smaling (1990) ont utilisé une série unique de données avec des classes eau/terre et des SETs. Cependant, le calcul se fait toujours sur la base du pays et les différences au sein du pays ne sont pas exprimées. Le système SIG et de base de données offre la possibilité de relier les systèmes d'aide à la décision et les modèles de croissance des cultures, mais ceci n'a pas encore été effectué.

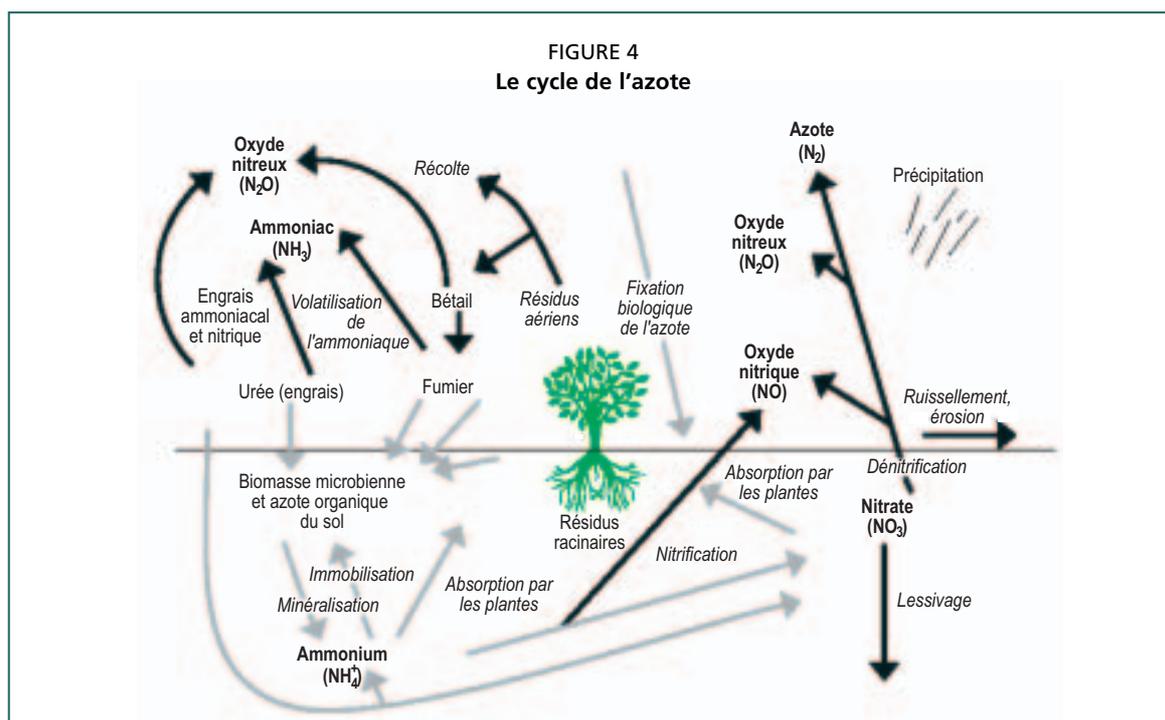
Bilans nationaux de l'azote du sol, OCDE

La question de l'utilisation agricole des éléments nutritifs a été une priorité pour l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) qui a développé une série d'indicateurs agro-environnementaux faisant partie intégrante de l'analyse des interactions entre l'agriculture et l'environnement et de l'impact des changements des politiques agricoles sur l'environnement.

Les principales questions environnementales ayant trait aux excédents d'azote résultant de l'agriculture comprennent la pollution des eaux de surface et souterraines et la pollution atmosphérique. Cependant, une carence en azote dans le sol peut aussi affecter la durabilité des ressources agricoles à travers la dégradation et l'épuisement du sol, avec pour résultat une diminution de la fertilité du sol dans les zones de production fourragère et agricole. En coopération avec l'Office statistique des communautés européennes (EUROSTAT), l'OCDE met à jour et améliore en ce moment les bilans azotés présentés ici (OECD, 2001a). Cette étude vise également à aborder les bilans phosphatés.

Méthodologie

Le bilan de l'azote du sol de l'OCDE correspond à la différence entre la quantité totale des intrants azotés pénétrant dans le sol et la quantité d'extrants azotés quittant le sol annuellement, sur la base du cycle de l'azote (figure 4). Par conséquent, la perte en azote



Note: Les flèches vertes représentent les intrants azotés (N) et les flèches brunâtres les extrants azotés. Les différents états de N sont représentés en bleu et les processus de transformation de N sont indiqués en rouge.
Source: OECD, 2001a.

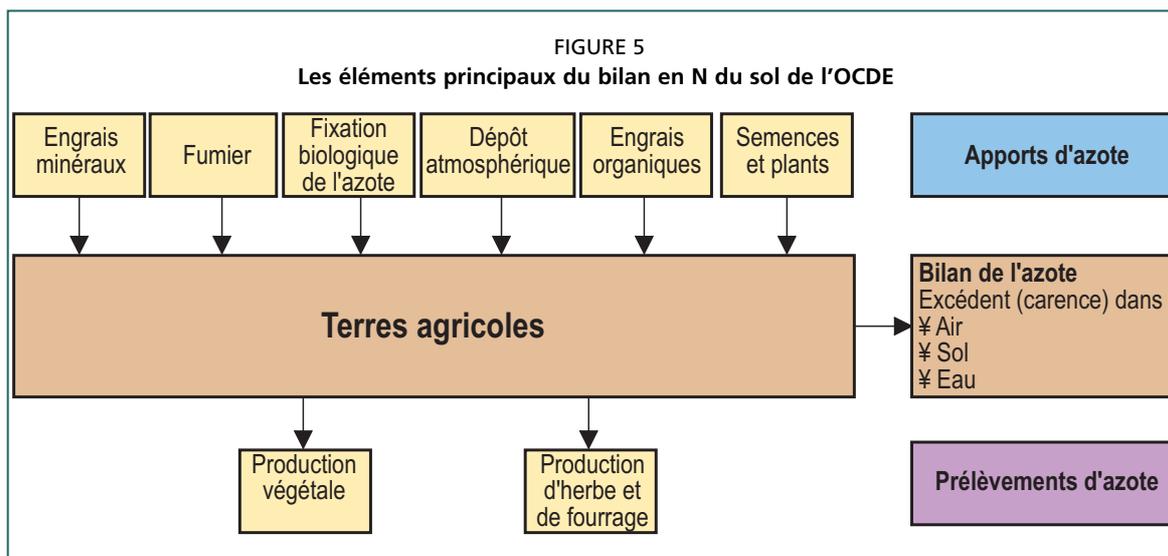
issue du bétail (par exemple, la volatilisation de l'ammoniaque résultant du stockage du fumier) n'apparaît pas dans le bilan, bien que la production du fumier soit une source importante d'azote, et a donc une incidence sur le bilan. Les excédents azotés peuvent rester dans le sol, s'infiltrer dans les eaux souterraines et se volatiliser dans l'air.

L'estimation de la quantité totale annuelle d'intrants azotés inclut l'addition de:

- engrais minéraux: quantité utilisée par l'agriculture;
- production de fumier azoté d'origine animale: quantité totale d'animaux (bovins, porcs, moutons, etc.) en fonction des espèces (par exemple poulets, dindes), du sexe, de l'âge et de la finalité (par exemple le lait de vache, gros bétail), multiplié par les coefficients respectifs de la quantité d'azote contenue dans le fumier par animal et par an;
- déposition atmosphérique de l'azote: surface totale de terres agricoles multipliée par un coefficient de l'azote déposé par hectare;
- fixation biologique de l'azote (FBA): superficie de cultures légumineuses ou de pâturage (par exemple fèves, soja, trèfle, luzerne, herbe) multipliée par les coefficients respectifs de fixation de l'azote par hectare, ainsi que la fixation d'azote par les organismes libres du sol multipliée par un coefficient de fixation d'azote par hectare;
- azote issu de la matière organique recyclée: quantité de boues d'épuration appliquée sur les terres agricoles multipliée par un coefficient de contenu N des boues d'épuration;
- azote contenu dans les semences et plants: quantité de semences et de plants (par exemple céréales et tubercules de pomme de terre) multipliée par les coefficients respectifs de contenu N.

Les estimations de la quantité annuelle d'extrants azotés inclut l'addition de:

- cultures récoltées: quantité récoltée (par exemple céréales, plantes à tubercules, légumineuses, fruits, légumes et cultures industrielles) multipliée par les coefficients respectifs de prélèvement en N pour produire une tonne de cultures;



- cultures fourragères: quantité de fourrage récoltée (par exemple betterave fourragère, foin et ensilage) et consommation d'herbe des pâturages temporaires et permanents multipliées par les coefficients respectifs de prélèvement azotés pour produire une tonne de fourrage.

Le calcul du bilan N du sol de l'OCDE n'est pas un calcul brut de toutes les pertes en N résultant des activités agricoles (figure 5). En effet, l'attention se porte sur les pertes en N dans le sol et dans l'eau. La volatilisation de l'ammoniaque du fumier stocké et des stabulations est exclue des calculs.

Les éléments de calcul de la base de données sont préliminaires et les définitions des données peuvent varier d'un pays à l'autre suivant les définitions des enquêtes d'origine. Par exemple, bien que les données de production des cultures fassent référence à l'état normal d'une culture spécifique sauf indication contraire (par exemple poids sec pour les céréales, le poids à l'état frais pour les légumes), la production fourragère risque de se rapporter à des poids ayant des teneurs différentes en eau selon les pays.

Les coefficients utilisés pour le calcul sont préliminaires et leur estimation peut varier selon les pays.

La base de données est constituée de 4 éléments (figure 6):

- engrais/bétail/cultures: données de base pour calculer le bilan azoté;
- coefficients: pour convertir les données de base (par exemple le nombre de têtes de bétail) en des équivalents azotés;
- la quantité d'azote: teneur en N, impliquant la multiplication des données de base par les coefficients azotés pour obtenir la teneur totale en N des intrants et des extrants;
- bilan azoté: incluant les principales catégories des apports et des prélèvements azotés, le calcul du bilan azoté (intrants moins extrants) et l'expression du bilan azoté en kilogrammes d'azote par hectare.

Le système de classification des cultures et du bétail provient des séries de données des sources nationales, d'EUROSTAT (pour les pays membres de l'Union Européenne) et de la FAO.

Les données ventilées sont fournies dans la mesure du possible, en particulier pour les séries de données concernant les cultures et le bétail, afin de faciliter une estimation plus précise du bilan azoté (par exemple les porcelets et les truies), et aussi le sous-total correspondant (par exemple le nombre total de cochons). Cependant, dans l'éventualité où les données ventilées n'existaient pas, des données d'ensemble sont présentées (par exemple le nombre total de cochons).

FIGURE 6
Résumé de la structure de la base de données

Données de base sur les engrais/bétail/cultures	Coefficients	Quantité d'azote	Bilan de l'azote
Engrais: produits organiques et minéraux (hormis le fumier)	Engrais: kg azote / tonne d'engrais	Engrais	Calcul du bilan total azoté et du bilan/ha
Bétail (nombre de têtes de bétail)	Fumier: kg azote / tête de bétail / an	Fumier	
Prélèvement du fumier par l'agriculture, réserves et importations de fumier	Prélèvements, réserves et importations de fumier: kg d'azote / tonne de fumier	Prélèvement, réserves et importations de fumier	
Production végétale	Cultures: kg d'azote prélevé / tonne de culture	Prélèvements d'azote par les cultures	
Production de fourrage	Fourrage: kg d'azote prélevé / tonne de fourrage	Prélèvements d'azote par les fourrages	
Semences et plants	Semences et plants: kg d'azote / tonne	Azote contenu dans les semences et les plants	
Superficie des cultures légumineuses	Fixation biologique de l'azote: kg d'azote / ha de culture légumineuse et de la superficie agricole totale (ha)	Fixation biologique de l'azote	
Superficie des terres agricoles	Dépôts atmosphériques: kg d'azote / ha de terres agricoles	Azote fixé de la déposition atmosphérique	

Les pays utilisent différents systèmes de classification pour comptabiliser les effectifs de têtes de bétail, tout particulièrement pour les bovins, les porcs et les volailles.

Engrais

Cette catégorie couvre les données sur la consommation d'engrais minéraux et d'engrais organiques, mis à part le fumier organique qui est traité séparément.

La consommation d'engrais minéraux inclut:

- la consommation d'engrais azotés exprimée en unités N.

Les engrais organiques incluent:

- les boues d'épuration y compris l'utilisation des boues d'épuration traitées par les municipalités;
- le compost urbain y compris l'utilisation du compost urbain issu de la collecte des déchets municipaux;
- les déchets industriels y compris l'utilisation des déchets industriels tels que les produits issus de l'industrie de transformation alimentaire;
- les autres produits comprenant les produits organiques utilisés en tant que fertilisants.

Nombre de têtes de bétail

Cette catégorie établit l'inventaire des animaux nécessaire pour calculer la quantité d'azote issue de la production du fumier organique. Le nombre de têtes de bétail inclut les animaux comptabilisés pour un jour donné de recensement de l'année en cours, et n'inclut pas le total d'animaux abattus au cours d'une année donnée. L'effectif total de bétail abattu au cours d'une année est représenté par le biais de coefficients utilisés pour convertir l'effectif de bétail en quantité d'azote du fumier. Les catégories de bétail comprennent:

- les bovins, y compris les bovins de boucherie, les vaches laitières et les veaux;
- les porcs, y compris les porcs de différentes gammes de poids;
- les ovins et les caprins, y compris les moutons, les chèvres et les agneaux;
- les volailles, y compris les poulets d'élevage et les poules pondeuses, et d'autres volailles telles que les canards et les dindes;
- d'autres types de bétail tel que les chevaux et les ânes.

Prélèvements, réserves et importations de fumier

Cette catégorie comporte des données sur le fumier prélevé n'ayant pas été utilisé sur les terres agricoles (y compris les exportations de fumier); l'augmentation ou la diminution des réserves de fumier qui doit être utilisé sur les terres agricoles; et le fumier importé dans un pays afin d'être utilisé sur les terres agricoles. Cette information offre une base de calcul des apports nets de fumier sur un terrain agricole pour une année donnée:

$$\text{Apport net} = \text{production de fumier} - \text{prélèvements} + \text{modifications des réserves de fumier} + \text{importations}$$

Les prélèvements de fumier représentent la quantité de fumier provenant des activités agricoles et qui n'est pas appliquée sur les champs. La volatilisation de l'ammoniaque et la minéralisation de N intervenant après l'application du fumier sont considérées comme faisant partie des pertes en éléments nutritifs (ou des excédents en éléments nutritifs) et ne sont pas incluses dans cette catégorie. Par contre, la destruction du fumier et la volatilisation de l'ammoniaque issue des réserves de fumier, des hangars pour animaux et des opérations d'épandage du fumier sont exclus du bilan. Les catégories de fumier sont les suivantes:

- la destruction et l'évaporation y compris la destruction du fumier et la volatilisation de l'ammoniaque provenant du fumier stocké, des hangars à animaux et des opérations d'épandage du fumier;
- l'utilisation à des fins non agricoles du fumier, par exemple pour les jardins privés;
- le fumier transformé en déchet industriel y compris les usines de traitement se chargeant de transformer le fumier en déchet industriel et qui n'est pas utilisé sur les terres agricoles;
- l'exportation d'engrais organiques y compris le fumier et les autres engrais organiques exportés d'un pays;
- d'autres types de prélèvements y compris les prélèvements de fumier organique;
- les changements dans les réserves de fumier y compris les changements obtenus par la déduction des réserves initiales de celles finales;
- l'importation d'engrais organiques y compris l'importation de fumier et d'autres engrais organiques.

Cultures et fourrages récoltés

Cette catégorie comprend des données sur: la production végétale (par exemple les céréales); les cultures permanentes (par exemple les agrumes); la production fourragère y compris les cultures fourragères récoltées (par exemple les betteraves fourragères) et la production pastorale issue des prairies temporaires et permanentes. Les définitions et les catégories de cultures et de fourrages suivent étroitement celles utilisées par la FAO.

Les cultures récoltées, quelle que soit leur finalité, englobent les cultures destinées à la consommation humaine, à l'alimentation du bétail, à l'utilisation industrielle et comme semences:

- les céréales y compris le blé, le riz et les céréales secondaires;
- les cultures oléagineuses y compris les cultures oléagineuses annuelles (par exemple le soja), les cultures oléagineuses pérennes (par exemple les olives), et les cultures oléagineuses telles que le soja, utilisées pour l'alimentation des animaux et pour la transformation des aliments et non pour la production d'huile végétale;

- les légumineuses et haricots secs, exprimé en poids sec et englobant les haricots, les fèves, les pois, les pois chiches et les lentilles, mis à part le soja;
- les plantes racines, comprenant principalement les cultures utilisées à des fins industrielles et alimentaires (par exemples les pommes de terre), mais excluant les plantes racines cultivées essentiellement pour l'alimentation, telles que les betteraves fourragères;
- les fruits y compris les espèces fruitières annuelles (par exemple les fraises) et les arbres fruitiers (par exemple les pommiers);
- les légumes y compris les légumes-feuilles (par exemple le chou), les plantes grimpanes (par exemple les tomates) et les légumes à racine (par exemple les carottes);
- les cultures industrielles, comprenant les cultures sucrières, les plantes à fibres et d'autres cultures industrielles (par exemple le tabac);
- les plantes ornementales telles que les fleurs;
- les autres produits récoltés comprenant ceux non couverts par les catégories mentionnées ci-dessus;
- le fourrage, englobant les cultures fourragères annuelles et le pâturage utilisé pour l'alimentation des animaux.

Résidus des cultures

Dans la mesure du possible, le calcul du bilan en azote du sol comprend l'utilisation ou la consommation 'réelle' des pâturages, et exclut la végétation qui n'est pas consommée par le bétail et qui reste sur le pré. Peu de pays rassemblent régulièrement les données relatives à la consommation des pâturages. Cependant, les statistiques concernant les superficies de pâture et la production pastorale sont généralement disponibles. La production pastorale inclut aussi bien la végétation pastorale consommée par le bétail que celle restant sur le pré. Pour les pays détenant uniquement des données relatives aux superficies des prairies, la production pastorale a été estimée par le biais d'un facteur de rendement.

Pour la plupart des pays, la consommation des pâturages a été estimée en utilisant le nombre de têtes de bétail au pâturage et les niveaux de consommation moyenne par animal, ou en utilisant la production pastorale et le rapport entre la consommation et la production.

La prise en compte de résidus de culture dans le bilan azoté du sol exige un effort de la recherche. En particulier, l'utilisation des coefficients de conversion de N doit être étudiée, c'est à dire les coefficients de prélèvements représentent la teneur en azote non seulement dans les graines de céréales récoltées mais aussi dans d'autres parties de la plante. Celles-ci peuvent d'ailleurs être retirées du champ ou même y rester. A ce stade de l'étude de l'OCDE sur les bilans en éléments nutritifs, les données ne sont pas disponibles.

Semences et plants

Cette catégorie couvre les données relatives aux principales catégories de semences et plants:

- les céréales y compris le blé, le riz et les céréales secondaires;
- les cultures oléagineuses y compris les cultures oléagineuses annuelles (par exemple le soja), les cultures oléagineuses pérennes (par exemple les olives), et les cultures oléagineuses telles que le soja, utilisées pour l'alimentation des animaux et pour la transformation des aliments et non pour la production d'huile végétale;
- les plantes racines, comprenant principalement les cultures utilisées à des fins industrielles et alimentaires (par exemple les pommes de terre), mais excluant

- les plantes racines cultivées essentiellement pour l'alimentation, telles que les betteraves fourragères;
- toutes les autres cultures

Fixation biologique de l'azote

Cette catégorie comprend les superficies de cultures contribuant à la FBA, principalement les légumineuses, le soja, le trèfle et la luzerne. La surface ensemencée est déterminante, à l'inverse de la surface de récolte des légumineuses car la FBA se produit sans tenir compte du fait que la culture est récoltée ou laissée sur le champ. Par exemple, les cultures légumineuses sont rarement récoltées mais elles sont plutôt incorporées afin de fournir de l'azote au sol.

Cette catégorie comprend également les données de superficie des terres, c'est à dire les terres arables et les terres en culture permanente ainsi que les pâturages permanents, afin de calculer la FBA par les micro-organismes libres du sol.

Utilisation des terres

Cette catégorie englobe les terres agricoles, qui sont subdivisées en terres arables et en terres en culture permanente et en pâturages permanents.

Les coefficients permettant de convertir les données de base en une teneur en azote, varient au cours du temps et selon les pays. Dans l'éventualité où la disponibilité des coefficients nationaux est limitée, l'approche suivante est utilisée à titre provisoire:

- Compte tenu de l'absence de données chronologiques, il est supposé que les coefficients d'azote sont restés identiques au cours de la période s'étalant de 1985 à 1997, excepté pour les Pays-Bas (coefficients annuels disponibles) et la Hongrie (les coefficients sont augmentés de 20 pour cent pour les saisons sèches).
- En cas d'absence de coefficients nationaux, les coefficients pour les pays ayant des caractéristiques 'identiques' sont utilisés.

Engrais

Cette catégorie indique les coefficients N permettant de convertir les quantités d'engrais minéraux et organiques. D'après leur définition (exprimé en teneurs d'azote et non en poids d'engrais), les engrais minéraux azotés ont un coefficient de conversion d'azote fixe de 1 000 kg/tonne. Le fumier n'est pas inclus dans cette catégorie.

Production de fumier

Cette catégorie fournit des coefficients permettant de convertir le nombre de têtes de bétail en quantité N de la production annuelle de fumier. Cependant, il convient de noter que:

- Du point de vue du niveau de la ventilation des données, la série des coefficients de conversion d'azote correspond aussi étroitement que possible aux données sur le nombre de têtes de bétail.
- Les coefficients prennent en compte l'abattage des animaux au cours d'une année donnée.

Importations, réserves et prélèvements de fumier

Cette catégorie fournit les coefficients de composition d'azote pour les prélèvements (y compris les exportations de fumier), les modifications des réserves et les importations en fumier.

Cultures et fourrages récoltés

Cette catégorie donne les coefficients de prélèvement d'azote permettant de convertir la production des cultures et du fourrage en une quantité d'azote prélevée du champ. Cependant, il convient de noter que:

- Du point de vue du niveau de la ventilation des données, la série des coefficients de conversion d'azote correspond aussi étroitement que possible aux données de production des cultures et de fourrages.
- Lorsque les coefficients de certaines cultures ne sont pas disponibles, les coefficients d'azote disponibles pour d'autres cultures similaires sont utilisés à titre provisoire (par exemple en appliquant le coefficient de l'orge à l'avoine).
- Comme le prélèvement d'azote inclut la teneur en azote des résidus de culture qui restent sur le champ, davantage de travail méthodologique est exigé afin de couvrir cet aspect correctement.

Semences et plants

Cette catégorie donne les coefficients permettant de convertir les quantités de semences et plants en azote. Les coefficients de ce groupe sont différents de ceux utilisés pour les cultures, qui ne traitent pas de la composition azotée mais de son prélèvement (y compris le prélèvement pour les produits secondaires, tels que les tiges et les feuilles).

Fixation biologique de l'azote

Cette catégorie propose les coefficients permettant de calculer la FBA provenant des cultures légumineuses et la FBA par les micro-organismes du sol sur l'ensemble des terres agricoles.

Déposition atmosphérique

Cette catégorie donne les coefficients permettant de calculer les dépôts atmosphériques de N sur l'ensemble des terres agricoles.

Dénitrification

Le processus de dénitrification se produisant sur les terres agricoles est important pour le Japon et la péninsule coréenne, où la production de riz apparaît comme la culture dominante des systèmes agricoles. Ce processus est caractérisé par la libération d'azote minéral sous forme d'azote gazeux (N₂). Celui-ci est considéré sans danger pour l'environnement car il est un composant principal de l'atmosphère.

Quantité d'azote

Cette catégorie donne la quantité totale d'azote du sol, exprimé en tonnes d'azote. Les données de ces tableaux sont en réalité issues de la multiplication des données de base (engrais/effectif de têtes de bétail/cultures) par les coefficients azotés.

Le calcul du bilan d'azote du sol est le suivant:

- Apports d'azote (tonnes de N) = engrais + apports nets de fumier + autres apports azotés (semences et plants, FBA et dépôts atmosphériques);
- Exportations d'azote (tonnes de N) = total des cultures récoltées + fourrage total
- Bilan azoté (tonnes de N) = exportations d'azote – apports d'azote;
- Bilan azoté par hectare de terres agricoles (tonnes/ha) = bilan azoté (tonnes de N) / superficie totale des terres agricoles (ha).

Résultats

La méthodologie développée par l'OCDE (OECD, 2001b) a été adaptée comme logiciel et programme de base de données. Cette base de données intègre des données de l'ensemble des pays de l'OCDE et couvre la période 1985-1998. L'utilisateur peut sélectionner les données désirées et calculer les bilans en éléments nutritifs.

Analyse

Cette étude s'intéressant principalement aux excédents, se différencie des études plus typiques ayant eu lieu en Afrique. La quantité de données nécessaire pour les modèles

de bilan en éléments nutritifs est importante et implique qu'un service statistique soit convenablement opérationnel. Ceci ne devrait pas représenter un problème pour les pays développés, mais pour les pays en voie de développement, les données sont nettement moins disponibles.

Les exportations EX3 (lessivage), EX4 (pertes gazeuses) et EX5 (érosion) ne sont pas intégrées, ce qui rend les bilans fortement positifs. Pour les pertes gazeuses, la dénitrification est prise en compte, mais les pertes en N_2O et NH_3 provenant des animaux, la volatilisation et le brûlis ne sont pas comprises. Par contre, les boues d'épuration ainsi que les semences et plants sont inclus.

Évaluation des éléments nutritifs du sol pour la Chine

Sheldrick, Syers et Lingard (2002) ont développé un modèle composé de différents intrants et extrants provenant des cycles de l'azote, du phosphore et du potassium. Ce modèle permet d'accomplir rapidement et avec suffisamment de précision une évaluation et un bilan des éléments nutritifs au niveau national. Sheldrick, Syers et Lingard (2003a) ont utilisé ce modèle afin de calculer les rapports entre les intrants et les extrants en éléments nutritifs, les bilans et les taux d'appauvrissement en éléments nutritifs entre 1961 et 1997.

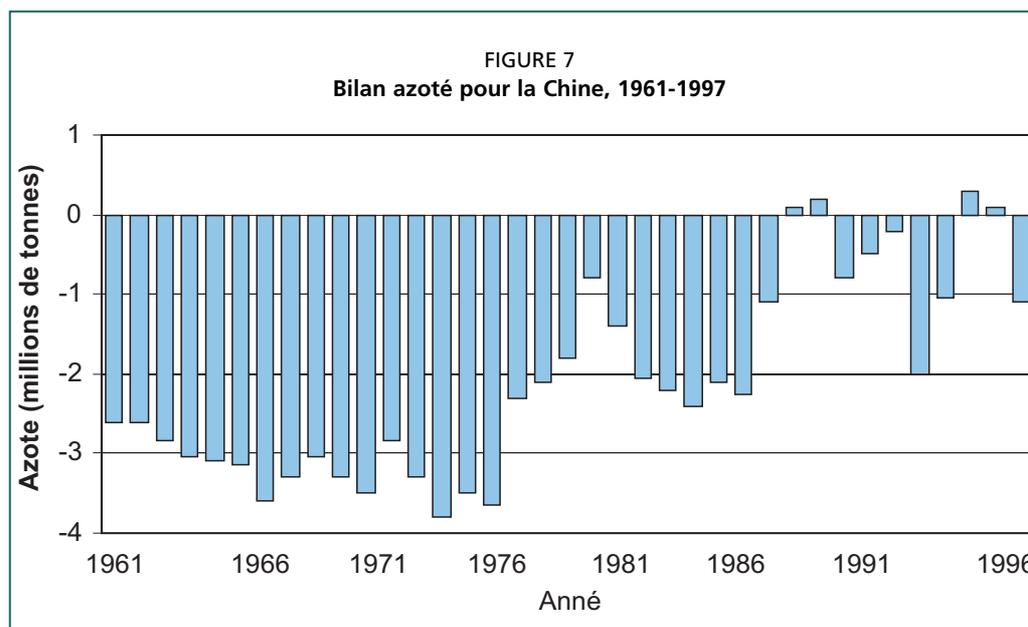
Méthodologie

Conceptuellement, ce modèle est équivalent à un bilan massique dans lequel les éléments nutritifs assimilés par les cultures et le bétail sont comparés aux éléments nutritifs apportés au sol. Ce modèle s'intéresse aux extrants suivants: les cultures annuelles, les résidus des cultures, les déjections des animaux et du bétail. Les intrants sont composés: des engrais minéraux, des résidus de culture, du fumier, des aliments pour animaux, des déchets végétaux, de la FBA et des dépôts atmosphériques. Les renseignements concernant les intrants, obtenus à partir des bases de données FAOSTAT, incluent la production agricole annuelle aussi bien pour les secteurs du bétail que pour les cultures, les engrais, l'utilisation des terres et la population.

Le modèle détermine l'efficacité des éléments nutritifs sous la forme d'un pourcentage de l'apport d'élément nutritif qui est récupéré en tant qu'extrait dans la culture. L'équilibre est accompli une fois que les extrants d'éléments nutritifs restent stables tandis que les intrants d'éléments nutritifs augmentent. L'étude évalue l'efficacité des éléments nutritifs par le biais des données d'intrants et d'extrants du modèle. Sur la base des évaluations en éléments nutritifs effectuées en 1996 pour 197 pays, l'efficacité N, P et K en Chine a été fixée respectivement à 50, 40 et 80 pour cent.

Concernant les résidus des cultures, il a été estimé que 40 pour cent était restitué, 25 pour cent était consommé comme fourrage pour les animaux et 35 pour cent était utilisé à d'autres fins ou était perdu à travers le cycle des éléments nutritifs dans le sol. La fixation de l'azote a été estimée à 65 pour cent du prélèvement total d'azote pour les légumes secs et l'arachide et à 50 pour le soja. Pour les engrais verts, il a été estimé que les intrants totaux azotés étaient de 0,6 pour cent. La fixation de l'azote du riz paddy par l'azolla a été considérée comme négligeable. Seuls les dépôts atmosphériques d'azote ont été pris en compte et fixés à 20kg/ha/an. Les déchets qui n'étaient pas issus du bétail ont été estimés en fonction de la population: 1 000 kg de N, 250 kg de P et 250 kg de K pour chaque tranche de 1 000 personnes.

Le modèle d'évaluation des éléments nutritifs comporte un sous-modèle qui permet d'estimer les quantités d'excrétions animales produites et récupérées en tant que fumier (Sheldrick, Syers et Lingard, 2003b). Cette étude a pris en considération un certain nombre de catégories de bétail (bovins, porcs, ovins, caprins, équidés et volailles). Le nombre total d'animaux a été multiplié par les coefficients respectifs afin de calculer la quantité d'éléments nutritifs contenue dans les déjections par animal et par an. L'effectif et les poids moyens des animaux abattus dans chaque pays ont été également



pris en compte grâce aux coefficients utilisés pour convertir l'effectif de têtes bétail en quantités d'éléments nutritifs contenus dans les déjections d'animaux.

Les pertes en éléments nutritifs telles que le lessivage, les pertes gazeuses et l'érosion ne sont pas estimées directement par le modèle, mais sont calculées par la différence entre les intrants en éléments nutritifs additionnés des pertes en éléments nutritifs du sol, et les éléments nutritifs contenus dans la culture. Sur la base du calcul du taux d'appauvrissement en éléments nutritifs déterminé par le modèle, les pertes totales en éléments nutritifs peuvent être calculées.

Résultats

Le bilan d'azote pour la Chine a été calculé entre 1961 et 1997 (figure 7). Au début, il y a eu un appauvrissement croissant de l'azote, mais en raison de l'importante utilisation d'engrais azoté, cet appauvrissement a par la suite diminué pour atteindre un semblant d'équilibre. Pour le phosphore et tout particulièrement pour le potassium, les bilans ont été de plus en plus négatifs. L'appauvrissement en potassium est passé de 28 kg/ha en 1961 pour atteindre 62 kg/ha en 1997. Le tableau 10 propose les flux d'intrants et d'extrants en éléments nutritifs pour la Chine. D'après le tableau, il apparaît que l'appauvrissement en potassium est le plus élevé.

Analyse

Ce modèle peut être facilement utilisé quel que soit le pays et l'année car il utilise uniquement les bases de données nationales disponibles. Cependant, le modèle comporte certaines simplifications majeures qui rendent les résultats moins fiables. Les coefficients de prélèvements des résidus de culture sont identiques pour toutes les cultures, alors que, par exemple, les coefficients des résidus de culture de céréales sont souvent plus utilisés que ceux des cultures pérennes. Les principales limitations du modèle sont dues à l'hypothèse selon laquelle l'efficacité des éléments nutritifs est une fonction directe des apports en éléments nutritifs. Les concentrations en éléments nutritifs ne peuvent pas changer à mesure que les apports en éléments nutritifs augmentent et le modèle ne permet pas de tenir compte des effets dus aux interactions entre N, P et K. Cet ensemble d'aspects rend le bilan total en éléments nutritifs moins fiable, car les autres pertes (érosion, lessivage et pertes gazeuses) sont basées de façon indirecte sur cette efficacité des éléments nutritifs.

TABLEAU 10
Flux des éléments nutritifs entrants et sortants pour les cultures de plein champ en Chine, 1997

Flux entrant	N		P		K	
	million de tonnes	%	million de tonnes	%	million de tonnes	%
Engrais	23,3	64,7	4,1	56,8	2,8	14,1
Résidus de culture	2,8	7,8	0,4	5,5	5,2	26,1
Fumier	5,2	14,4	1,8	25,1	3,4	17,1
Fixation de N	1,0	2,8				
Déposition de N	1,4	3,8				
Effluents traités	1,2	3,4	0,3	4,3	0,3	1,5
Du sol	1,1	3,1	0,6	8,3	8,2	41,2
Flux sortant						
Cultures annuelles	12,0	33,4	2,3	31,2	4,6	23,0
Résidus de culture	7,0	19,4	1,0	13,8	12,9	65,0
Pertes	17,0	47,1	4,0	55,0	2,4	12,0

Étude du bilan en éléments nutritifs du sol pour l'Afrique subsaharienne, FAO, 2003

La FAO a chargé l'université de Wageningen au Pays-Bas de réaliser cette activité de recherche en collaboration avec les partenaires nationaux de trois pays africains (FAO, 2003). L'objectif de cette étude était de revoir et de synthétiser les travaux effectués sur les réserves en éléments nutritifs du sol, les flux et les bilans au niveau macro et micro, et d'en faire le calcul au niveau méso pour quelques pays de l'ASS. L'objectif fondamental du projet était de proposer une méthodologie à l'attention des planificateurs nationaux et des autres parties intéressées du niveau méso afin de mieux cibler les mesures permettant d'augmenter la fertilité des sols à une échelle donnée. La partie de l'étude consacrée au niveau méso est discutée un peu plus loin dans ce chapitre.

Le projet s'est intéressé à trois pays: le Ghana, le Kenya et le Mali. Ces pays représentent les ZAEs et les paysages principaux de l'ASS et sont dotés de systèmes agricoles distincts. La méthodologie a été développée de telle manière que celle-ci puisse être appliquée à l'ensemble des pays de l'ASS, car les données relatives aux intrants (cartes SIG au niveau continental et les données FAOSTAT) sont disponibles pour chaque pays. Les calculs ont été effectués pour N, P et K sur la base des données moyennes pour la période 1997-1999.

Méthodologie

La méthodologie se base sur les travaux de Stoorvogel et Smaling (1990), avec cinq flux entrants et sortants, mais a été mise à jour et rendue explicite du point de vue spatial. La série de données sur les SETs ont constitué une série de données uniques, seules les données issues de FAOSTAT, exprimées au niveau du pays et des cultures, sont maintenant disponibles. Par conséquent, une nouvelle approche basée sur les cartes d'utilisation des terres a été nécessaire. Compte tenu que l'utilisation des terres est le principal moteur des flux et des bilans en éléments nutritifs, celle-ci a été choisie comme le fondement de la méthodologie. Une procédure a été élaborée afin de créer une carte d'utilisation des terres basée sur les aptitudes culturales et indiquant la répartition la plus probable des cultures. Cette carte quadrillée, dont les dimensions des cellules sont de 1 km, a été associée à d'autres données spatiales nécessaires pour le calcul du bilan en éléments nutritifs.

La méthodologie visant à établir la cartographie de l'utilisation des terres se fonde sur trois principes fondamentaux:

1. Identifier les unités de terrain dotées de conditions topographiques, climatiques et de sol similaires.
2. Assortir les propriétés des unités de terrain aux besoins des cultures.

3. Séparer les données relatives aux zones cultivées de FAOSTAT selon des unités de terrain

Afin de créer les cartes d'utilisation des terres, les données suivantes ont été utilisées:

- Le modèle altimétrique digital GTOPO30 (USGS, 1998);
- La carte mondiale des sols de la FAO (FAO/UNESCO, 1997);
- La base de données sur le changement climatique de l'institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (Leemans et Cramer, 1991);
- Les zones agroécologiques mondiales (FAO et IIASA, 2000);
- Les cartes de couverture végétale pourvues de la légende de «couverture végétale saisonnière de la région» (USGS, University of Nebraska-Lincoln et European Commission's Joint Research Centre, 2000);

IN1: Engrais minéraux

Les apports en engrais minéraux ont été calculés par culture. Une fraction de la consommation totale en engrais par élément nutritif a été attribuée à chaque culture (le total étant égal à 1). Les facteurs se sont basés sur les données d'utilisation des engrais par culture (IFA/IFDC/FAO, 2000). Ces données n'étaient pas disponibles pour chaque pays. Pour le Ghana et le Mali, cette étude a utilisé les données des pays voisins faisant partie de la même ZAE. Les chiffres de consommation totale d'engrais ont été fournis par la base de données FAOSTAT.

IN2: Intrants organiques

Les cartes de densité de bétail étaient disponibles pour les principales classes de bétail, c'est à dire, les bovins, les petits ruminants et les volailles. La FAO et le groupe de recherche en environnement d'Oxford Limited ont élaboré les cartes relatives aux bovins et aux petits ruminants (FAO, 2000). La carte de densité des volailles est basée sur la population rurale de l'ASS (FAO, 2001). Il a été estimé que la quantité de volailles avait une répartition spatiale identique à celle de la population rurale. Les densités de bovins ont été multipliées par la teneur en éléments nutritifs du fumier et par les déjections par animal et par an. Ces calculs ont permis de calculer la quantité totale d'éléments nutritifs produite par classe de bétail.

La procédure de calcul par quadrillage a été la suivante:

$IN2 = \text{densité de bétail} \times \text{facteur de fumier} \times \text{facteur de gestion (pendant le pâturage)}$
 + données agrégées de densité de bétail \times facteur de fumier \times facteur de gestion (application de bomas etc.).

où:

- la densité de bétail: en kilogrammes par kilomètre carré, provenant des atlas relatifs au bétail,
- le facteur de fumier: facteur de déjection et de teneur en éléments nutritifs,
- le facteur de gestion: le facteur connexe à la culture et au pays (tiré des ouvrages, des rapports d'experts) qui indique la période du pâturage, le mode d'application et les pertes.

Ce calcul a été réalisé pour chaque groupe de bétail (les bovins, les petits ruminants et les volailles) et les valeurs ont été additionnées.

IN3: Dépôts atmosphériques

Les apports en éléments nutritifs, provenant du processus de déposition, sont issus de deux phénomènes: les dépôts humides liés aux précipitations et les dépôts secs liés à la poussière transportée par l'Harmattan. Une carte pourvue des valeurs de déposition des poussières transportée par l'Harmattan a été élaborée par interpolation, basée sur plusieurs sources bibliographiques et sur des caractéristiques du vent. A partir de cette carte, il a été possible de calculer la quantité de dépôts, alors que l'indice

des précipitations a découlé de la carte des précipitations de l'IIASA (Leemans et Cramer, 1991).

IN4: Fixation de l'azote

Les apports par FBA sont issus de différents processus, c'est à dire: la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses, la fixation non symbiotique de l'azote et les arbres capables de fixer l'azote. Sur la base de certains ouvrages (Giller, 2001; Danso, 1992; Giller et Wilson, 1991; Hartemink, 2001), les pourcentages de prélèvement total d'azote par la fixation symbiotique ont été les suivants:

- Arachide – 65 pour cent;
- Soja – 67 pour cent;
- Légumes secs – 55 pour cent;
- Canne à sucre – 17 pour cent.

Concernant le riz aquatique, les cyanobactéries fixent l'azote et la valeur utilisée pour cette étude a été de 15 kg de N/ha/an. Cette valeur est plutôt inférieure à celle apparaissant lors des expériences, mais l'effet des cyanobactéries est surestimé et elles n'interviennent pas sur toutes les terres agricoles. Cette fixation d'azote se produit uniquement pour le riz aquatique, or en Afrique plus de 50 pour cent de la culture du riz se fait sous riziculture pluviale. Par conséquent, la quantité de fixation d'azote par les cyanobactéries a été multipliée par un facteur de riz aquatique. Le Ghana possède 15 pour cent de riz aquatique, le Kenya 25 pour cent et le Mali 95 pour cent (Nyanteng, 1986). Peu d'ouvrages sont consacrés à la fixation non symbiotique de l'azote et aux arbres capables de fixer l'azote. Cet apport a été estimé sur la base de l'indice de précipitations et par l'intermédiaire de l'équation suivante (l'azote fixé est exprimé en kilogrammes par hectare et les précipitations en millimètres par an);

$$N \text{ fixé} = 0,5 + 0,1 \times \sqrt{\text{précipitations}}$$

IN5: Sédimentation

Ce flux est composé de deux parties: les apports en éléments nutritifs par l'eau d'irrigation et les apports de sédiments résultant de l'érosion. La FAO et l'université de Kassel en Allemagne ont élaboré une carte du monde des zones irriguées (Döll et Siebert, 2000). Les apports en éléments nutritifs ont été calculés en associant cette carte avec la quantité estimée d'eau d'irrigation (Stoorvogel et Smaling, 1990) fixée à 300 mm/ha/an, et avec la teneur en éléments nutritifs de l'eau d'irrigation (N: 3,3 mg/litre, P: 0,43 mg/litre et K: 1,4 mg/litre). Les apports en sédiments ont été calculés par le biais du modèle LAPSUS «Processus de modélisation du paysage à des dimensions et des échelles multiples» et a permis de faire le lien entre IN5 et EX5. Grâce au modèle, il a été possible de déterminer la sédimentation nette exprimée en mètres et aussi de convertir cette valeur en termes d'apport en éléments nutritifs en l'associant avec la densité apparente et la teneur en éléments nutritifs.

EX1: Produits des cultures

Cette étude a calculé les extrants en éléments nutritifs par produits des cultures en multipliant le rendement par la teneur en éléments nutritifs des cultures. Les statistiques de la FAO (FAOSTAT) ont apporté les données sur les superficies de culture, la production et donc le rendement pour chaque pays.

EX2: Résidus de culture

Cette étude a calculé les extrants en éléments nutritifs contenus dans les résidus de culture en multipliant le rendement par la teneur en éléments nutritifs des résidus de culture et par un facteur d'exportation en éléments nutritifs. Ce dernier est spécifique à une culture et un pays donnés et se fonde sur la connaissance des experts et sur un nombre limité d'ouvrages. Le facteur d'exportation reflète le type de gestion. Les

facteurs d'exportation pour le centre du Kenya, doté d'une forte densité de population et de nombreux animaux, sont plus élevés que ceux du sud du Ghana, où le bétail est toutes proportions gardées sans importance. Un type particulier d'exportation des résidus est le 'brûlis'. Il est difficile de déterminer l'ampleur du brûlis à ce niveau macro. Par conséquent, le brûlis a été considéré uniquement pour le coton, car les agriculteurs brûlent normalement ces résidus afin d'éviter les maladies et les organismes nuisibles. L'ensemble de l'azote est perdu par volatilisation et il est estimé que 50 pour cent du potassium est perdu directement par lessivage.

EX3: Lessivage

Le lessivage peut être considéré comme un flux d'extrants important pour l'azote et le potassium. De Willigen (2000) a développé un modèle de régression afin d'estimer la quantité d'azote lessivée. Ce modèle est tiré d'une recherche bibliographique considérable et peut être utilisé pour un large éventail de sols et de climats. Un nouveau modèle de régression a été élaboré pour le lessivage du potassium, basé sur la même série de données:

$$\text{Lessivage de N} = (0,0463 + 0,0037 \times (P / (A \times E))) \times (F + D \times NMO - p)$$

$$\text{Lessivage de K} = -6,87 + 0,0117 \times P + 0,173 \times F - 0,265 \times CEC$$

où:

P = précipitations annuelles (mm),

A = argile (pour cent),

E = épaisseur de la couche (m) = profondeur des racines (FAO, 1998),

F = azote contenu dans les engrais organiques et minéraux (kg N/ha),

D = taux de décomposition (= 1,6 pour cent par an),

NMO = quantité d'azote dans la matière organique du sol (kg N/ha),

p = prélèvement par la culture (kg N/ha),

CEC = capacité d'échange cationique (cmol/kg).

Le modèle de régression du lessivage de l'azote s'appuie sur 43 mesures, où 67 pour cent de la variance est représentée. (De Willigen, 2000). L'équation a été légèrement révisée en faveur des cultures pérennes en multipliant la quantité d'azote présente dans la matière organique du sol par 0,5. Compte tenu que les cultures pérennes peuvent prélever l'azote tout au long de l'année, la légère révision de l'équation a permis de prévenir la surestimation du lessivage de l'azote. Le modèle de régression du potassium se fonde sur 33 expériences représentatives et la valeur de R^2 est de 0,45.

EX4: Pertes gazeuses

Cette étude a développé un modèle de régression afin d'estimer les pertes en azote gazeux. L'équation possède deux composantes: un modèle de régression pour les pertes par dénitrification de N_2O et NO_x , et un facteur direct de perte par volatilisation de NH_3 . Les équations sont basées sur des données tirées d'ouvrages sur les environnements tropicaux. Celles-ci découlaient d'une série de données établie dans le but d'estimer les émissions mondiales gazeuses de NH_3 , NO et N_2O issues des terres agricoles (IFA/FAO, 2001). Le modèle de régression de N_2O s'est appuyé sur une série de données tirée de 80 expériences et la valeur R^2 a été de 0,45. Le modèle de régression de NO_x s'est appuyé sur 36 mesures différentes et la valeur R^2 a été de 0,91. Au niveau des émissions de NH_3 , 73 mesures ont été disponibles. Sur le total d'azote appliqué, 11,3 pour cent a été perdu, avec un écart type empirique de 6,2 pour cent.

$$EX4 = (0,025 + 0,000855 \times P + 0,01725 \times F + 0,117 \times O) + 0,113 \times F$$

où:

P = précipitations annuelles (mm),

F = azote contenu dans les engrais organiques et minéraux (kg N/ha),

O = teneur en carbone organique (pour cent).

EX5: *Erosion*

Cette étude a utilisé le modèle LAPSUS afin d'estimer l'érosion (Schoorl, Sonneveld et Veldkamp, 2000; Schoorl, Veldkamp et Bouma, 2002). Ce modèle simule la quantité d'érosion et de sédimentation à l'échelle du paysage. Cette méthode comporte plusieurs avantages: des données quantitatives sont générées, l'érosion ainsi que la sédimentation sont prises en compte. La plupart des paramètres des données du modèle LAPSUS, se basent sur le quadrillage des attributs topographiques (inclinaisons des pentes) d'un MAD et donnent l'évaluation des excédents de précipitations qui vont générer l'érosion par ruissellement.

Les données suivantes ont été utilisées:

- MAD, avec une résolution de 1 km (USGS, 1998);
- carte de couverture végétale (USGS, University of Nebraska-Lincoln et European Commission's Joint Research Centre, 2000);
- carte des précipitations (Leemans et Cramer, 1991);
- facteur d'érodibilité du sol (facteur K), tiré de la carte mondiale des sols (FAO/UNESCO, 1997);
- profondeur du sol, tiré de la carte mondiale des sols (FAO/UNESCO, 1997).

Le modèle a permis d'élaborer une carte d'érosion et de sédimentations nettes dont les unités sont en mètres et convertible en tonnes par hectare. Il est possible de calculer la perte ou le gain en éléments nutritifs en multipliant l'érosion du sol par les teneurs en éléments nutritifs du sol et par un facteur d'enrichissement. Sur la base des ouvrages consacrés à ce sujet, l'étude a utilisé les facteurs d'enrichissement suivants: 2,3 pour N; 2,8 pour P; et 3,2 pour K (FAO, 1984; FAO, 1986; Khisa *et al.*, 2002). Il est possible de déterminer la teneur en éléments nutritifs du sol à partir de la carte des sols. A la suite de l'érosion, la zone de profondeur d'enracinement s'étend, ce qui signifie que de nouveaux éléments nutritifs vont réussir à parvenir aux racines des plantes. Cette étude estime que 25 pour cent de phosphore et de potassium, perdu en raison de l'érosion, a bénéficié à la zone racinaire par le biais de ce processus.

Jachère

La superficie des jachères a été calculée en soustrayant la somme totale des zones cultivées de l'ensemble des terres arables. IN1 et EX1 ne sont pas considérés pour la jachère. IN2 et EX2 sont liés car ils prennent en considération les animaux en pâturage et ces mêmes animaux lors de leurs défécations. Il n'est pas possible de savoir si IN2 devrait être plus important que EX2, ou inversement. La totalité du fumier n'est pas laissée sur le champ (seul environ 57 pour cent y reste), mais, il convient de noter que de nombreux aliments pour animaux sont obtenus du pâturage intervenant le long des routes mais aussi de sources autres que les résidus de culture. Ainsi, pour les terres en jachères, il a été estimé que la quantité d'éléments nutritifs provenant du fumier (IN2) était égale à la quantité perdue par le pâturage (EX2).

Calcul des réserves du sol en éléments nutritifs

L'ensemble des données relatives aux sols pour le niveau macro (Batjes, 2002) a été puisé dans la base de données sur l'inventaire mondial des potentiels d'émission des sols (WISE - World Inventory of Soil Emission Potentials), élaborée par le Centre international de référence et d'information pédologique (ISRIC). La base de données WISE se compose d'une série de données mondiales uniformisées dotées de profils de sols géopositionnés, classifiées selon une légende développée par la FAO-UNESCO (1974) et une légende révisée (1988). Cette base de données fournit les profils de sol pour l'Afrique: 1 799 profils de sol différents et donnant des détails de 81 unités de sol différentes.

Cette étude a calculé les propriétés de sol suivantes pour chaque unité de sol: l'argile, le pH, le carbone organique, l'azote total, le potassium échangeable, la capacité d'échange cationique, le phosphore disponible et la densité apparente. La profondeur

et l'érodibilité du sol ne sont pas des paramètres pour la base de données WISE. Ils ont été estimés pour chaque unité de sol compte tenu qu'ils sont indispensables au modèle de sédimentation-érosion. La base de données WISE donne des détails des propriétés du sol par horizon, mais cette étude a utilisé seulement une valeur par unité de sol. Les données d'horizon ont été converties en une valeur unique par profil de sol.

Afin de calculer les pertes en potassium et phosphore par érosion, les valeurs ont dû être recalculées pour les obtenir sous forme de pourcentages de la masse totale du sol. Le potassium échangeable est facilement mesurable par le biais de sa densité apparente et de sa masse atomique de 39,1. Pour le phosphore, il n'existe pas de relation directe entre la quantité totale et la quantité disponible de P, d'après la base de données WISE. Différentes méthodes analytiques existent pour déterminer la quantité de phosphore disponible et chacune d'entre elles a une relation différente avec la quantité totale de phosphore dans le sol. D'après la base de données WISE, 83 pour cent de l'ensemble des analyses ont été réalisées selon la méthode P-Olsen. La méthode Bray a été utilisée pour 6 pour cent et la méthode Truong pour 3 pour cent de toutes les analyses. Les valeurs de P-Olsen correspondent au phosphore total comme suit: > 15 est élevé, 5-15 est modéré et < 5 est faible pour P-Olsen alors que pour le phosphore total, > 1 000 ppm est élevé, 200-1 000 ppm est modéré et < 200 ppm est faible (Landon, 1991). L'équation de régression suivante a été préparée pour rapporter le phosphore disponible au phosphore total:

$$P_{\text{total}} = 13 \times P_{\text{disponible}}^{1,5}$$

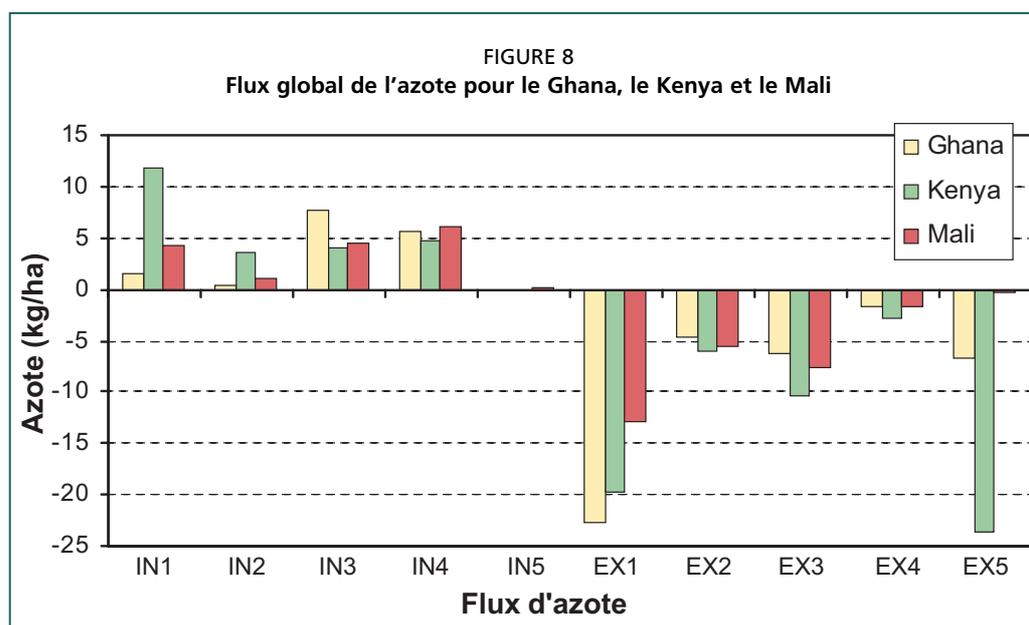
Résultats

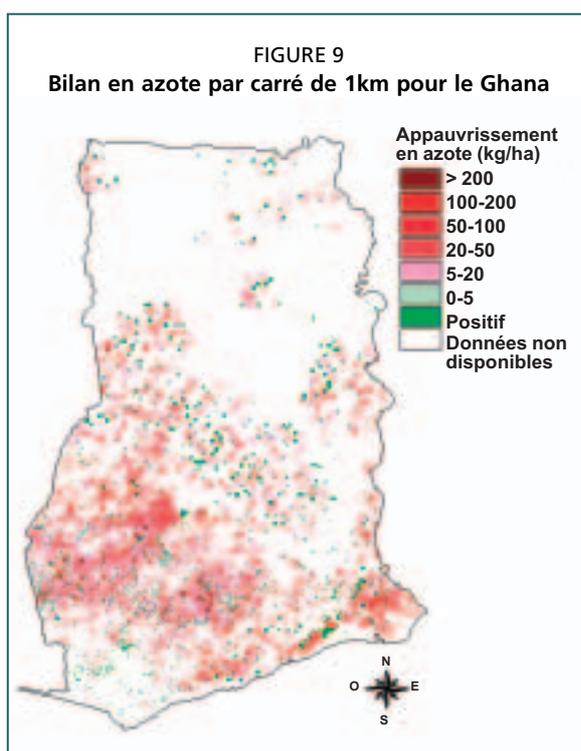
Le tableau 11 présente le bilan total en éléments nutritifs pour les trois pays. La figure 8 met en évidence les différences de flux d'éléments nutritifs entre les pays et révèle que l'érosion est la cause principale du bilan négatif en éléments nutritifs pour le Kenya. Les résultats de ces calculs peuvent être liés à la carte d'utilisation des terres d'origine et permet ainsi de présenter les résultats de façon géographique (figure 9). La liaison du système de la base de données avec le SIG facilite l'analyse des résultats par culture, par flux d'éléments nutritifs et par région.

TABLEAU 11

Bilans totaux en éléments nutritifs

	N	P	K
	(kg/ha)		
Ghana	-27	-4	-21
Kenya	-38	0	-23
Mali	-12	-3	-15





Analyse

La procédure de calcul utilisée au niveau macro a subi de nombreuses améliorations méthodologiques par rapport à l'étude continentale d'origine de Stoorvogel et Smaling.

Tout d'abord, la méthodologie était explicite et ainsi les variations des sols et de climat ont pu être prises en compte. Les zones caractérisées par un appauvrissement en éléments nutritifs élevé et faible au sein du pays ont également pu être indiquées. Les procédures permettant de calculer les flux d'éléments nutritifs ont aussi été sujettes à de nettes améliorations (tableau 12). Finalement, les réserves en éléments nutritifs ont été quantifiées pour chaque unité de sol en remplacement des trois classes distinctes de fertilité des sols, basées sur la classification des sols de la FAO.

NIVEAU MÉSO

Etude du bilan en éléments nutritifs du sol pour la région de Kisii, Kenya

A la suite de l'étude continentale sur le bilan en éléments nutritifs des systèmes d'utilisation des terres en ASS (Stoorvogel et Smaling, 1990), des simplifications relatives à l'échelle sont apparues inévitables (Stoorvogel, Smaling et Janssen, 1993). Par conséquent un travail similaire a été préparé pour une petite zone dont l'état des lieux est déjà bien connu, la région de Kisii dans le sud-ouest du Kenya (Smaling, Stoorvogel et Windmeijer, 1993). Cette région, s'étendant sur 2 200 km² et se trouvant à une altitude de 1 500-2 200 m, avait 1,5 millions d'habitants en 1990. Cette zone est dotée d'un grand potentiel agricole, mais la population croissante entraîne une surexploitation des terres. Les données primaires disponibles étaient relatives: au climat, à la configuration du relief, aux sols, à l'exploitation des terres, à l'utilisation des engrais minéraux et du fumier de ferme, aux rendements des cultures, aux résidus de culture et de leurs teneurs en éléments nutritifs.

TABLEAU 12

Améliorations de la procédure de calcul par rapport à l'étude de 1990

Flux	Améliorations méthodologiques
IN1	Données d'utilisation des engrais par culture (IFA/IFDC/FAO, 1999) disponible
IN2	Cartes de densité de bétail et distinction entre les bovins, les petits ruminants et les volailles
IN3	Carte des dépôts transportés par l'Harmattan et davantage de valeurs bibliographiques disponibles
IN4	Pourcentages de fixation de l'azote basés sur davantage d'ouvrages dédiés à ce sujet
IN5	Renseignements et liens entre érosion-sédimentation introduits par le modèle LAPSUS
EX1	Similaire à l'étude datant de 1990
EX2	Similaire à l'étude datant de 1990
EX3	Nouveaux modèles de lessivage, basés sur de plus amples données, tout particulièrement pour l'azote (De Willigen, 2000)
EX4	Nouveaux modèles de régression, basés sur de plus amples données de l'IFA/FAO (2001)
EX5	Erosion simulée par un modèle dynamique de paysage LAPSUS (Schoorl, Veldkamp et Bouma, 2002)

La région a été divisée en deux zones selon les températures et sept TUTs. Elles comprenaient: le pâturage extensif dans la brousse, le pâturage intensif sur les prés améliorés, le thé, le pyrèthre, le café, la banane, la canne à sucre, le maïs et les haricots (monoculture ou cultures intercalaires) la patate douce et les jachères. Cinq zones de précipitations ont été distinguées, avec des indices de précipitations annuelles de 1 350-2 050 mm, et 20 unités de sol ont été considérées, en majeure partie formées de roches volcaniques. Cinquante CETs ont ainsi été reconnues, et en les associant avec les TUTs, 107 SETs ont pu être ainsi distingués.

Méthodologie

Le bilan en éléments nutritifs composé de cinq flux entrants (IN1-IN5) et de cinq flux sortants (EX1-EX5), d'après Stoorvogel et Smaling (1990), a été utilisé pour le calcul.

IN1

Les apports d'engrais minéraux sont basés sur les données de consommation d'engrais de 1980. Celles-ci ont été multipliées par 2,5 pour N, 2 pour P et 3 pour K compte tenu de l'augmentation considérable de la consommation d'engrais au Kenya. Le thé a reçu la plupart des engrais azotés et les engrais phosphatés ont été principalement appliqués au maïs.

IN2

Des données provenant d'enquêtes étaient disponibles. Les teneurs en éléments nutritifs du fumier ont été fixés à 1,3 pour cent pour N, 0,5 pour cent pour P et 1,6 pour cent pour K, sur la base de la matière sèche. La presque totalité du fumier a été appliquée au café et aux bananes, et provenait en majeure partie des enclos et des écuries.

IN3

La déposition atmosphérique a été estimée d'après les équations de régression de Stoorvogel et Smaling (1990). Les intrants en éléments nutritifs ont été fonction de la racine carrée des précipitations moyennes annuelles. Les coefficients de régression pour N, P et K ont été respectivement de 0,140, 0,023 et 0,092.

IN4

La FBA a été représentée par la somme de la fixation non symbiotique de l'azote et de la contribution des haricots, l'unique espèce légumineuse de la zone d'étude. La fixation symbiotique de l'azote a été fixée à 50 pour cent du prélèvement total en azote. La fixation non symbiotique de l'azote a été déterminée par l'intermédiaire de l'équation de régression de Stoorvogel et Smaling (1990):

$$IN4 = 2 + (P - 1\ 350) \times 0,005$$

IN5

La sédimentation n'a pas été prise en compte car elle n'est pas caractéristique de la zone concernée.

EX1

Les statistiques de production étaient disponibles et ont été multipliées par la teneur en éléments nutritifs des cultures. L'exportation des éléments nutritifs des produits cultivés a ainsi pu être calculée. Le peu d'information disponible n'a pas permis de prendre en compte les différences d'efficacité dans l'utilisation des éléments nutritifs.

EX 2

L'exportation des éléments nutritifs par les résidus de culture a été calculée en multipliant la quantité des résidus par les teneurs en éléments nutritifs et par un facteur d'exportation.

TABLEAU 13
Pourcentages de lessivage de N et K en fonction de la pluviométrie et de la teneur en argile

Teneur en argile (%)	1 350		1 500		1 700		1 900		2 050	
	N	K	N	K	N	K	N	K	N	K
< 35	25	0,80	29	0,85	32,5	0,90	36	0,95	40	1
35-55	20	0,65	22,5	0,70	25	0,75	27,5	0,80	30	0,85
> 55	15	0,50	16,5	0,55	17,5	0,60	18,5	0,65	20	0,70

EX3

Le lessivage de l'azote et du potassium a été déterminé à l'aide d'une fonction de transfert. Le lessivage de l'azote a été calculé comme un pourcentage de la somme de l'azote minéral contenu dans le sol (N_{min}) et de l'azote appliqué par les engrais minéraux et organiques. Les pourcentages étaient fondés sur les précipitations et la teneur en argile (tableau 13).

$$N_{min} = 20 \times N_{tot} \times M$$

où:

N_{tot} = teneur totale en azote dans les premiers 20 cm du sol,

M = taux de minéralisation (2,5 ou 3,0 pour cent).

Le lessivage du potassium a été calculé de manière similaire par le biais des pourcentages indiqués dans le tableau 13. Ceux-ci ont été multipliés par la somme de potassium échangeable (en kilogrammes par hectare) et par le potassium contenu dans les engrais minéraux et organiques.

EX4

Pour les pertes en azote gazeux, seule la dénitrification a été prise en compte. Une fonction de régression a été développée sur la base d'une recherche bibliographique:

$$EX4 = (-9,4 + 0,13 \times A + 0,01 \times P) \times (N_{min} + N_{eng})$$

où:

A = teneur en argile (pour cent),

P = précipitation moyenne annuelle (mm/an),

N_{min} = azote minéral du sol (kg/ha),

N_{eng} = azote contenu dans les engrais minéraux et organiques.

EX5

L'EUPT a permis de calculer l'érosion. L'estimation de la perte annuelle en terre par hectare est effectuée en fonction de l'érosivité par l'eau de pluie (E), l'érodibilité du sol (K), l'inclinaison de la pente (I), la longueur de la pente (L), le couvert végétal (C) et la gestion des terres (P). Le facteur E a été fixé à 0,25 pour la région tout entière. Le facteur K a été dérivé de la texture, de la teneur en matière organique et de la perméabilité du sol. Les facteurs I et L ont été déterminés selon les équations suivantes:

$$I = (0,43 + 0,30 \times i = 0,043 \times i^2) / 6,613$$

$$L = (d/22,13)^{0,5}$$

où:

i = l'inclinaison (pourcentage),

d = la longueur de la pente (m), fixée à 100 m.

Un facteur C moyen a été estimé pour chaque TUT.

Le facteur P est fonction de la pente (i): $P = 0,2 + 0,03 \times i$

La perte en terre ($E \times K \times I \times L \times C \times P$) a été multipliée par la teneur en éléments nutritifs du sol et par un facteur d'enrichissement équivalent à 1,5 afin de déterminer la perte en éléments nutritifs causée par l'érosion. Concernant P et K , la perte nette a été multipliée par 0,75 pour compenser la formation du sol à la base des racines.

Pour les jachères qui ont un cycle d'une année, on a supposé des conditions d'équilibre, c'est à dire $IN - EX = 0$

TABLE 14

Bilan en éléments nutritifs des différentes composantes des types d'utilisation des terres

Composante de TUT	Superficie	N	P	K
	(ha)		(kg/ha/an)	
Jachère (année entière)	8 800	0	0	0
Pâturage extensif	1 800	-43	-1	-9
Pâturage permanent	29 200	-98	-6	-49
Thé	19 600	-67	6	-30
Pyrèthre	17 800	-147	-24	-96
Café	16 500	-82	0	-34
Banane	2 900	-87	-5	-48
Canne à sucre	1 500	-129	-10	-91
Maïs (saison 1)	13 400	-105	2	-83
Haricots (saison 1)	1 900	-73	-6	-55
Maïs + Haricots (saison 1)	42 800	-83	11	-63
Patate douce	1 600	-75	-6	-51
Maïs (saison 2)	900	-102	-1	-80
Haricots (saison 2)	13 800	-75	-13	-58
Maïs + Haricots (saison 2)	9 300	-78	4	-65
Jachère (saisonnier)	35 600	-53	-7	-29
Moyenne	157 700	-112	-3	-70

Résultats

Le bilan en éléments nutritifs, c'est à dire la somme des flux d'éléments nutritifs entrants soustraite à la somme des flux d'éléments nutritifs sortants, pour la région a atteint -112 kg/ha pour N, -3 kg/ha pour P et -70 kg/ha pour K. La récolte des cultures (IN1) et la perte des éléments nutritifs due à l'érosion (EX5) ont été les facteurs contribuant le plus à ce bilan négatif. Pour l'azote, le lessivage (EX3) a également été un facteur contribuant à ce même bilan. Le tableau 14 présente le bilan en éléments nutritifs pour chaque TUT. Les pertes les plus élevées se sont produites lors de la culture du pyrèthre et dans une moindre mesure pour celle de la canne à sucre et du maïs.

Analyse

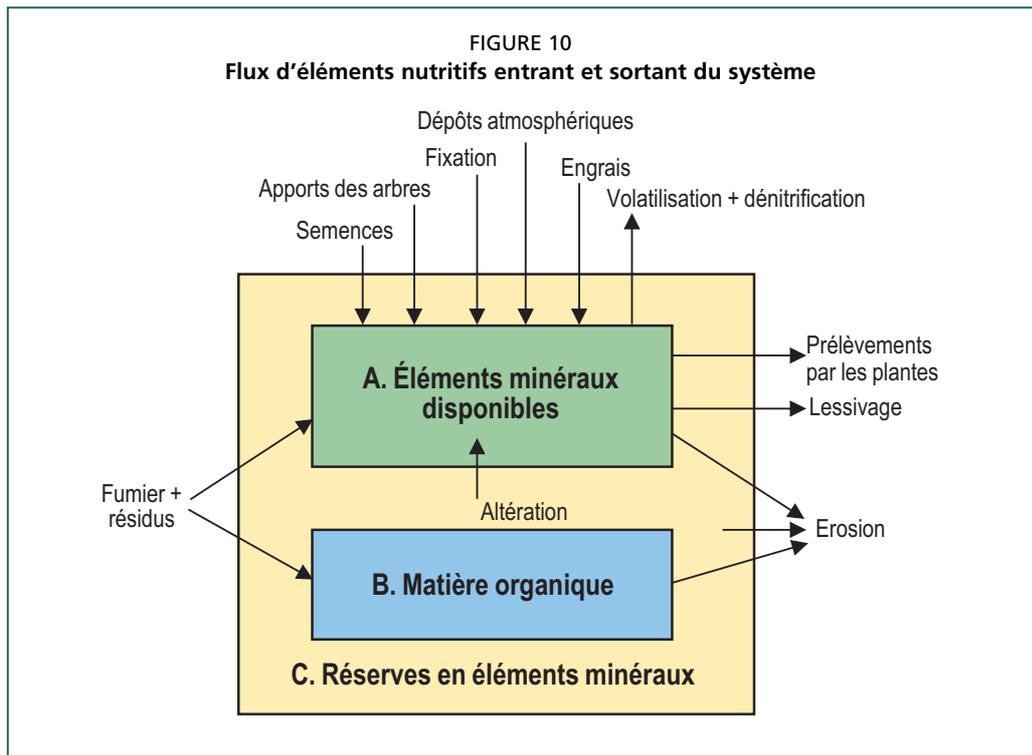
Cette étude est basée sur la méthodologie de Stoortvogel et Smaling (1990), mais il a été possible de calculer plusieurs flux de façon plus détaillée, car la région de l'étude était restreinte. Pour IN1, IN2, EX1 et EX2, des données locales plutôt que des estimations de moyennes nationales ont été utilisées. A cette échelle, il a également été possible de calculer l'érosion (EX5) par le biais de l'EUPT, et non grâce aux estimations. Cependant, les autres flux se sont basés sur des fonctions de transfert, qui ne sont pas spécifiques d'une région donnée.

Etude du bilan en éléments nutritifs du sol, sud du Mali

Les bilans en éléments nutritifs ont été calculés et évalués économiquement pour le sud du Mali (Van der Pol, 1992; Van der Pol et Traoré, 1993). Cette étude s'est intéressée aux systèmes de culture du sud du Mali, qui sont principalement le coton, le sorgho et le mil. Suite au retrait des subventions pour les engrais, la quantité d'engrais par hectare a diminué et l'augmentation de la production est uniquement attribuable à l'accroissement des terres de culture du coton. L'appauvrissement en éléments nutritifs qui en résulte augmente le risque de dégradation des terres.

Méthodologie

Le bilan en éléments nutritifs pour la région du sud du Mali est effectué sur la base des bilans de différents systèmes de culture. Les données bibliographiques ont été combinées avec des statistiques de production rassemblées au niveau local. L'étude est basée sur le calcul du bilan en éléments nutritifs décrite par Pieri (1989) et Frissel



(1978).

Les éléments nutritifs du sol ont été classés en trois blocs:

- A: les éléments minéraux qui peuvent être absorbés par les plantes
- B: les éléments associés à la matière organique du sol
- C: les réserves du sol en éléments minéraux

La figure 10 représente les flux d'éléments nutritifs entrant et sortant du système et entre les trois blocs.

Afin de restreindre l'analyse à des dynamiques à long terme, les éléments du bloc A et du bloc B ont été considérés comme des éléments nutritifs. La dimension des deux blocs détermine dans une large mesure la fertilité du sol. L'appauvrissement en éléments nutritifs est fortement lié au déclin progressif de la teneur en matière organique du sol. Les quantités d'éléments nutritifs perdues chaque année ont été utilisées afin d'estimer le rythme de cette diminution.

Par contre, les éléments du bloc C, les réserves en éléments minéraux, n'ont pas été considérées comme des éléments nutritifs. Sur la base d'une échelle de temps pertinente aux processus de formation du sol, un équilibre risque de se former entre les réserves en éléments minéraux et les éléments nutritifs disponibles et organiques. Cependant, sous les pressions exercées par les activités humaines, les rythmes de modifications de ces derniers blocs sont trop élevés pour qu'une telle situation puisse être atteinte. Ainsi, il a été supposé que les éléments puissent être disponibles suite à la transformation et à la dissolution des minéraux du sol à un rythme constant, c'est à dire le taux d'altération.

Processus influençant les réserves en éléments nutritifs

Les processus ayant une influence sur les réserves en éléments nutritifs sont les suivants:

- Extrants d'éléments nutritifs:
 - exportation par les cultures;
 - pertes par lessivage;
 - pertes par érosion;

- pertes par volatilisation/dénitrification;
- incorporation d'azote et de potassium dans les réserves minérales ('fixation irréversible').

➤ Intrants d'éléments nutritifs:

- application d'engrais;
- application de fumier organique;
- restitution des résidus de culture;
- fixation symbiotique de l'azote;
- fixation non symbiotique de l'azote;
- recyclage des éléments nutritifs lessivés et fixation biologique par les arbres;
- déposition atmosphérique par la pluie et les poussières;
- transformation et dissolution des minéraux du sol;
- apports par le biais des semences.

La différence entre les intrants et les extrants représente le bilan net en éléments nutritifs.

Acidification

L'acidification des sols apparaît lors de l'intensification des modes de culture. Alors que l'acidification des sols peut être corrigée par le chaulage, cette étude a considéré l'acidification comme résultant d'un 'bilan en chaux' négatif. Les sols s'acidifient par le lessivage du potassium, du calcium (Ca) et du magnésium (Mg). La perte de ces éléments fait partie du bilan en éléments nutritifs mais, en plus, l'acidification se produit après l'application d'engrais ammoniacal ou d'urée, à la suite des réactions de nitrification. Afin de calculer l'acidification, il a été supposé que pour chaque kilogramme d'engrais azoté, 1,75 kg de chaux (CaCO_3) était nécessaire pour la neutralisation.

Marges de fiabilité et facteurs d'incertitude

Les données de base concernant les intrants et les extrants d'éléments nutritifs ont été sélectionnées dans les ouvrages consacrés à ce sujet et d'après les statistiques de production. Les données bibliographiques se rapportent à différents sites d'Afrique de l'Ouest, mais ne sont pas nécessairement représentatives de la zone d'action de la Compagnie malienne pour le développement des textiles (CMDT) du sud du Mali. Compte tenu de la variation des précipitations, des propriétés des sols, etc., il a ainsi été nécessaire de procéder à des 'estimations intelligentes'.

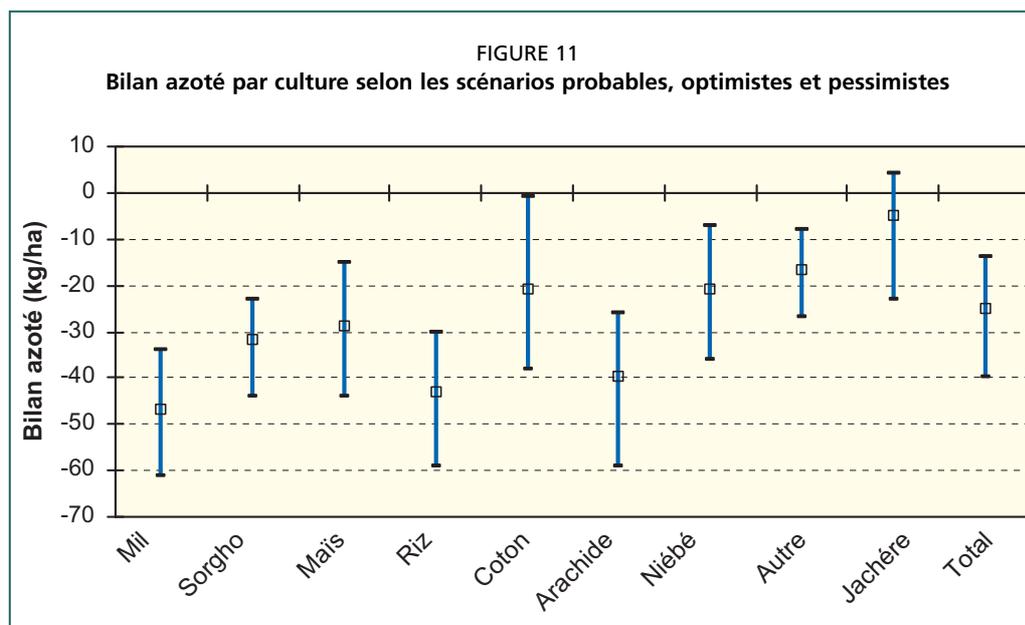
D'après les données, une 'valeur la plus probable' pour la région étudiée a été choisie, ainsi qu'une marge de variation des valeurs représentant un niveau de probabilité de 95 pour cent. Si un poids statistique identique est attribué à l'ensemble des données bibliographiques, la 'valeur la plus probable' représente la moyenne arithmétique et la marge de variation correspond au double de l'écart type de la valeur moyenne. Cependant, compte tenu de la variabilité des propriétés du sol et des précipitations, et du fait que les données bibliographiques ne sont pas toutes basées sur le même nombre d'expériences, les estimations subjectives de la fiabilité des valeurs ont été plus appropriées qu'une procédure purement statistique.

Scénarios optimistes et pessimistes

Trois valeurs de bilan en éléments nutritifs ont été calculées. La première s'est basée exclusivement sur l'utilisation des valeurs les 'plus probables'. La valeur calculée est celle qui a le mieux représenté le bilan réel en éléments nutritifs de la région. La seconde valeur, qualifiée d'optimiste est fondée sur une combinaison d'estimations d'extrants faibles avec des estimations d'intrants élevées. La troisième valeur, qualifiée de 'pessimiste', est basée sur des estimations d'extrants élevées avec des estimations d'intrants faibles.

TABLEAU 15
Bilans en éléments nutritifs calculés pour le sud du Mali

	N	P	K	Ca	Mg	Chaux
	(kg/ha)					
Valeur probable	-25	0	-20	3	-5	-12
Optimiste	-14	2	-10	12	0	-9
Pessimiste	-40	-2	-33	-8	-10	-16



Résultats

Le tableau 15 présente les bilans totaux en éléments nutritifs pour le sud du Mali. Il révèle que l'azote et le potassium sont les éléments faisant le plus défaut. La majorité des bilans sont négatifs, même selon les scénarios les plus optimistes. Les bilans ont également été calculés par culture (figure 11). Ceux-ci permettent ainsi de faire des comparaisons entre les cultures et de tirer des conclusions sur les bilans les plus favorables.

Analyse

Les scénarios optimistes et pessimistes sont un complément précieux car ils donnent une meilleure vision des dimensions des problèmes d'appauvrissement en éléments nutritifs et des variations et incertitudes liées aux résultats. Par rapport au modèle de Stoorvogel et Smaling (1990), le phosphore et le potassium ont été introduits au stock d'éléments minéraux en tant que flux sortants, mais l'altération et l'apport avec les semences ont été inclus au bilan en tant que flux entrants. Par contre, la sédimentation et l'irrigation, qui peuvent être apportées tout particulièrement pour le riz, n'ont pas été intégrées au calcul.

L'approche composée de différents blocs est plus réaliste que l'approche 'boîte noire' et donne une meilleure idée du système du sol. Cependant, de façon pratique, il sera difficile de faire la distinction entre les différents blocs.

Etudes de bilan en éléments nutritifs en Inde

Les études de bilan en éléments nutritifs du sol dans différentes zones agroécologiques de l'Inde, basées sur de vastes paramètres d'intrants et d'extrants, offrent un aperçu au

niveau méso des aspects de fertilité du sol. Une des études considère l'appauvrissement en éléments nutritifs dans différentes zones agroclimatiques de l'état d'Andhra Pradesh alors que l'autre étude s'est intéressée à l'exportation des éléments nutritifs dans l'état de Rajasthan.

Méthodologie

Andhra Pradesh

L'exportation des éléments nutritifs des sols par différentes cultures au sein de diverses zones agroclimatiques d'Andhra Pradesh a été calculée sur la base de l'exportation des éléments nutritifs selon un rendement économique spécifié (Singh *et al.*, 2001). Des données au niveau régional sur la superficie et la production pour 1998-1999 ont été utilisées pour 15 cultures principales. Des données d'utilisation des engrais au niveau régional ont été rassemblées. Grâce aux données utilisées au niveau régional, les compléments en éléments nutritifs au niveau des zones ont été déterminés en ajoutant les données de l'ensemble des régions rentrant dans la zone respective.

Il a été supposé que neuf cultures principales étaient responsables de la consommation de 95 pour cent de l'engrais alors que les 5 pour cent restants ont été attribués aux autres cultures et aux fruits et légumes. De plus, en calculant la part d'éléments nutritifs d'origine organique, on a supposé que le potentiel total des différentes ressources organiques était réparti uniformément au sein des sept zones agroclimatiques. Enfin, pour faciliter les calculs, 10 pour cent du potentiel total en éléments nutritifs d'origine organique a été considéré piégeable. Le bilan a été calculé comme suit:

$$\text{Bilan en éléments nutritifs} = [(A \times 0,95) \times FE] + (B \times 0,10) - [TR]$$

où:

A = total des éléments nutritifs, provenant des engrais, utilisés dans la zone pour l'ensemble des cultures,

FE = facteur d'efficacité de l'emploi des engrais ($N = 0,45$; $P = 0,25$; $K = 0,70$),

B = apport d'éléments nutritifs par le biais des fumiers organiques,

TR = total des éléments nutritifs exportés par les cultures.

Rajasthan

Les exportations en éléments nutritifs ont été calculées sur la base des chiffres de production pour les principales cultures et des chiffres moyens d'exportation en éléments nutritifs provenant de plusieurs études (Gupta, 2001). Les données d'utilisation d'engrais minéraux sont issues des agences d'engrais. Un certain nombre de besoins a été ressenti tel qu'une base de données systématique à l'égard du statut en éléments nutritifs des sols, de l'exportation des éléments nutritifs par différentes cultures/variétés, de la quantité d'azote fixé par différentes légumineuses et de la contribution des fumiers organiques. Le bilan en éléments nutritifs a été calculé comme suit:

$$\text{Bilan en éléments nutritifs} = [(A \times FE) + D + FBA] - [TR]$$

où:

A = total des éléments nutritifs provenant des engrais,

FE = facteur d'efficacité de l'emploi des engrais (0,50),

D = apport d'azote par le biais des précipitations (5 kg/ha/an),

FBA = fixation d'azote grâce aux légumineuses (15 kg/ha/an),

TR = total des éléments nutritifs exporté par les cultures.

Résultats

Pour la région d'Andhra Pradesh, le bilan azoté total a été positif (0,207 millions de tonnes), alors que les bilans en phosphore et en potassium ont été négatifs (respectivement de -0,133 millions de tonnes et de -0,431 millions de tonnes). Les résultats ont considérablement varié selon les zones agroclimatiques.

Analyse

Les deux études ont utilisé un simple bilan en éléments nutritifs doté de flux entrants et sortants principaux. Cependant, elles ont négligé des flux sortants importants comme le lessivage et l'érosion. De plus, il est quelque peu difficile de comparer ces études avec d'autres compte tenu que les résultats sont exprimés en tonnes plutôt qu'en kilogrammes par hectare. Cependant, les résultats montrent nettement les différences relatives entre les zones et peuvent ainsi constituer un fondement pour de futures stratégies, par exemple pour une augmentation de l'utilisation d'engrais.

Étude du bilan en éléments nutritifs du sol en Afrique subsaharienne, FAO, 2003

L'objectif général de cette étude et de sa composante au niveau macro, est passé en revue ci-dessus. L'hypothèse spécifique de cette étude est que le niveau méso offre un point de départ approprié facilitant l'intervention des décideurs politiques et du secteur privé, alors que les niveaux macro et micro ne sont pas adéquats pour les décideurs politiques au niveau sous-national. Au niveau méso, la composante commerciale risque de jouer le rôle moteur du système agricole, permettant ainsi son intensification et son expansion. La composante économique qui en résulte pourra alors aider la gestion de la fertilité du sol.

L'étude s'est intéressée à trois systèmes agricoles composés de cultures de rente ou d'autre composante agricole orientée sur le marché: le système agricole basé sur le cacao dans les régions de Nkawie et de Wassa Amenfi au Ghana, le système agricole lait-café-thé de la région d'Embu au Kenya et le système agricole orienté sur le coton de la région de Koutiala au Mali.

Méthodologie

Au niveau méso, la méthodologie a utilisé le mode de calcul suivi pour le niveau macro. Cependant, en raison du manque de données spatiales dotées de degré élevé de résolution, il n'a pas été possible de procéder à des calculs sur une base géographique. Par conséquent, le bilan en éléments nutritifs a été calculé grâce à une base tabulaire. Les relations entre l'utilisation des terres et des sols ont été déterminées afin de compenser le manque de données géographiques.

Au niveau méso, un quadrillage de 1 km est trop grossier pour représenter les différences physiographiques avec suffisamment de précision. Bien qu'une carte d'utilisation des terres puisse être créée sur la base de photographies aériennes ou d'images satellites additionnées de vérifications rapides sur le terrain, de telles cartes n'ont pas été disponibles pour les zones d'étude.

La disponibilité des données pour l'ensemble des trois pays a été très variée et n'a donc pas permis d'utiliser une approche générique pour le niveau méso. Les procédures utilisées pour chaque flux d'éléments nutritifs sont décrites ci-dessous.

IN1 Engrais minéraux

Les données relatives aux engrais minéraux sont issues d'enquêtes au niveau des exploitations agricoles, des doses recommandées d'application d'engrais et des données au niveau macro, selon la disponibilité des données. Les doses recommandées d'application d'engrais sont d'une manière générale nettement plus élevées que les doses réelles d'application, compte tenu du fait que les agriculteurs ne peuvent pas se permettre, ou ne désirent pas, appliquer une telle quantité d'engrais. Par conséquent, afin d'éviter toute surestimation, les doses d'application d'engrais ont été multipliées par un facteur représentant le rapport entre la surface cultivée au niveau méso et la surface cultivée au niveau national.

IN2 Engrais organiques

La quantité de fumier disponible a été calculée en fonction du nombre de têtes de bétail de la zone d'étude, tout en intégrant les facteurs d'excrétion, de teneurs et de pertes en éléments nutritifs. L'application par culture provient d'estimations et d'enquêtes au niveau des exploitations agricoles. Les valeurs locales de teneur en éléments nutritifs ont été utilisées quand elles étaient disponibles.

IN3 Dépôts atmosphériques

Les dépôts atmosphériques ont été estimés à partir du niveau macro. Quand les stations météorologiques disposaient des chiffres concernant les précipitations, ceux-ci ont été utilisés.

IN4 Fixation de l'azote

La fixation de l'azote a été traitée de manière similaire qu'au niveau macro. Quand les données spécifiques concernant la fixation de l'azote étaient disponibles, celles-ci ont été incluses, par exemple les systèmes d'agroforesterie avec les arbres capables de fixer l'azote.

IN5 Sédimentation

L'irrigation n'a pas représenté d'intérêt pour les trois zones d'étude. La sédimentation a été estimée pour les cultures poussant dans les vallées fluviales, par exemple pour le riz. Le modèle LAPSUS n'a pas été utilisé en raison du manque de données géographiques.

EX1 Produits récoltés

Les données de production des cultures ont été multipliées par les teneurs en éléments nutritifs des cultures. Quand les facteurs locaux de teneur en éléments nutritifs étaient disponibles, ceux-ci ont été utilisés car leur valeur peut être considérablement différente des valeurs moyennes continentales utilisées pour le niveau macro.

EX2 Résidus des cultures

Les facteurs d'exportation des résidus de culture ont été calculés à partir des enquêtes effectuées auprès des exploitations agricoles ou des estimations fournies par les experts locaux. Ces facteurs ont été multipliés par les facteurs de production et de teneur en éléments nutritifs des résidus de cultures.

EX3 Lessivage

Les modèles de régression utilisés pour le niveau macro ont permis de calculer le lessivage de l'azote et du potassium.

EX4 Pertes gazeuses

Les modèles de régression utilisés pour le niveau macro ont permis d'estimer les pertes gazeuses en azote.

EX5 Erosion

Des estimations ont été effectuées pour chaque culture. Ces estimations ont pris en compte les différences régionales de topographie et de sols et se sont basées sur la connaissance des experts et sur les ouvrages dédiés à ce sujet. Bien que le modèle LAPSUS était adéquat pour le niveau méso, celui-ci n'a pas été utilisé en raison du manque de données géographiques.

TABLEAU 16
Bilans en éléments nutritifs de deux régions de culture du cacao au Ghana

Cultures	Région de Nkawie			Région de Wassa Amenfi				
	Superficie (ha)	N	P (kg/ha)	K	Superficie (ha)	N	P (kg/ha)	K
Cacao	48 493	-3,2	-0,1	-8,5	240 961	-1,5	-0,2	-9,2
Maïs	11 455	-32,4	-6,3	-20,3	5 650	-23,8	-5,4	-13,5
Manioc	11 838	-68,3	-9,6	-59,0	7 700	-53,3	-7,6	-50,3
Plantain	11 725	-8,7	-0,3	-35,6	5 000	-6,2	-0,5	-35,4
Chou caraïbe	9 514	-50,8	-3,3	-39,9	3 000	-34,0	-1,9	-26,1
Igname	1 175	-55,0	-3,7	-42,9	1 500	-85,8	-6,0	-63,3
Riz	1 462	7,5	4,0	-9,8	2 112	10,1	5,0	-7,3
Légumes	-	-	-	-	250	-57,8	-7,0	-29,3
Palmier à huile	-	-	-	-	900	-29,2	-7,2	-54,1
Jachère	14 600	-0,6	0,9	-2,5	7 300	1,8	0,9	-3,2
Total	110 262	-18,0	-1,9	-20,3	274 373	-4,3	-0,5	-11,4

Résultats

L'étude a comparé deux régions du Ghana. La région de Nkawie est plus densément peuplée et a une grande expérience de la culture du cacao. La région de Wassa Amenfi a connu une forte augmentation de la superficie des terres de cacao au cours de ces dernières années, bien que la région soit moins apte à la culture du cacao.

Le tableau 16 indique les bilans en éléments nutritifs par culture pour les deux régions. Les bilans pour la région de Nkawie sont davantage négatifs que ceux de la région de Wassa Amenfi. Cette différence s'explique principalement par la superficie cultivée de cacao, qui est de 58 pour cent pour la région de Nkawie et de 90 pour cent pour la région de Wassa Amenfi. Le bilan en éléments nutritifs pour le cacao n'est que très légèrement négatif, contrairement à la majorité des cultures. Les bilans en éléments nutritifs du manioc, de l'igname et du chou caraïbe sont très négatifs.

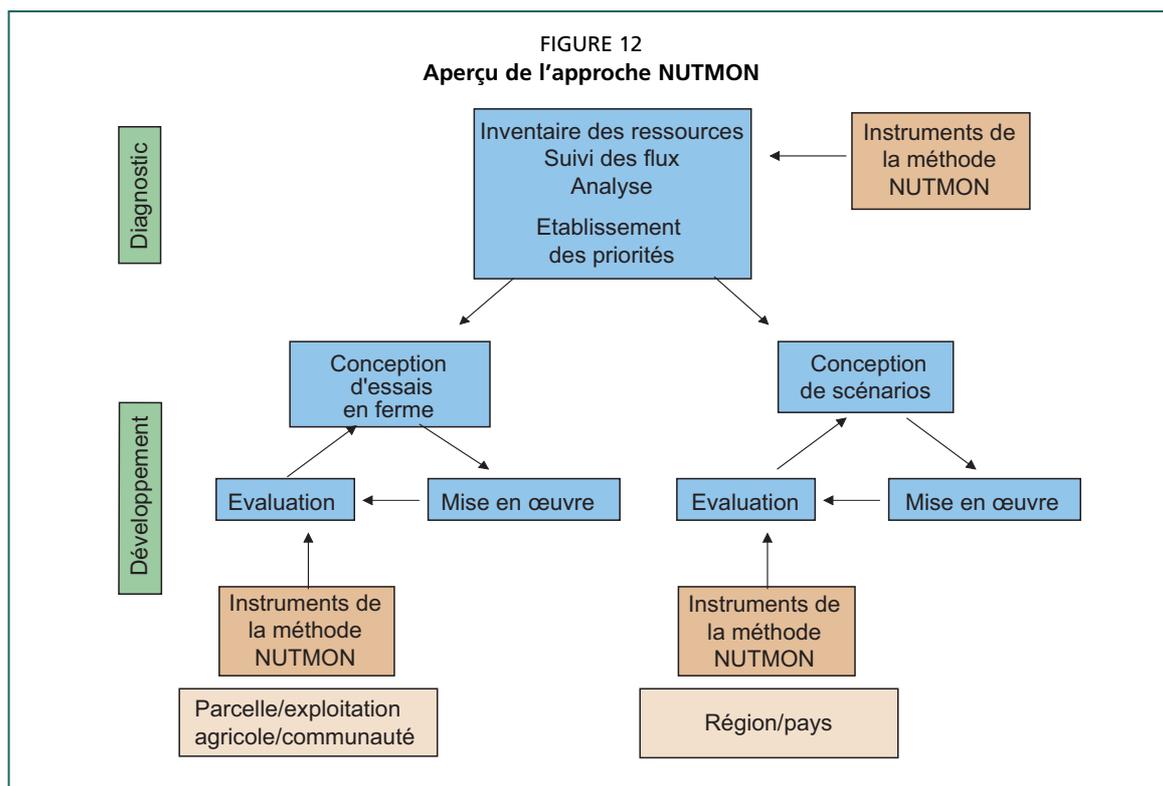
Analyse

L'étude indique que le bilan en éléments nutritifs au niveau méso peut être effectué correctement à condition que suffisamment de données soient disponibles. Les résultats au niveau méso offrent des informations qui ne peuvent être déduites des études au niveau macro et micro. Pour cette étude, les données spatiales n'étaient pas disponibles en quantité suffisante. En particulier, les estimations relatives à l'érosion peuvent être considérablement améliorées par le biais du modèle LAPSUS. Sans la composante géographique, l'approche au niveau méso n'est guère bien différente des précédents cas d'étude au niveau méso.

NIVEAU MICRO

NUTMON – suivi des éléments nutritifs dans les systèmes agricoles tropicaux

NUTMON (NUTrient MONitoring) est une méthodologie intégrée et multidisciplinaire qui s'adresse aux différents acteurs s'intéressant à la gestion des ressources naturelles d'une manière générale et aux éléments nutritifs du sol d'une façon plus particulière. Grâce à la méthodologie NUTMON, les agriculteurs et les chercheurs peuvent conjointement analyser la durabilité financière et environnementale des systèmes agricoles tropicaux. La méthode NUTMON (le manuel ainsi que son logiciel) a été élaborée afin de combiner l'évaluation des réserves et des flux en éléments nutritifs avec les analyses économiques effectuées au sein des exploitations agricoles. Elle a été testée et appliquée dans différentes ZAEs en étroite coopération avec des partenaires du Kenya, d'Éthiopie, d'Ouganda, du Burkina Faso, de Chine et du Viet Nam (Vlaming *et al.*, 2001). De plus amples informations sont disponibles à l'adresse internet suivante: www.nutmon.org.



Les techniques de recherche participative, telles que les cartes des flux de ressources, le classement par matrice et l'analyse des tendances sont utilisées afin de recueillir les points de vue des agriculteurs. Une analyse quantitative génère des indicateurs tels que les flux et les bilans en éléments nutritifs, les flux de trésorerie, les marges bénéficiaires brutes et le revenu de l'exploitation agricole. Les analyses, aussi bien quantitative que qualitative, sont alors utilisées pour améliorer ou concevoir de nouvelles technologies qui visent à faire face aux problèmes de gestion de la fertilité du sol et qui peuvent aider à améliorer la performance financière de l'exploitation agricole.

Le problème de la gestion de la fertilité du sol a des aspects biophysiques, économiques et socioculturels. Du point de vue biophysique, la diminution de la fertilité du sol est liée à l'application faible ou inefficace de fumier et d'engrais, à des pratiques de gestion des exploitations qui mènent à des pertes élevées en raison du lessivage et de l'érosion, et au manque d'intégration du bétail. Le déclin de la fertilité du sol est aussi lié à la vision économique à court terme des exploitations agricoles, au climat et à l'environnement de marché peu sûrs, aux droits fonciers mal définis, à l'infrastructure limitée et à la gestion des risques. Les aspects socioculturels sont également importants car ils influencent les processus décisionnels des agriculteurs. La perception, la connaissance, la créativité et la compétence des agriculteurs sont des éléments essentiels à l'adoption de nouvelles technologies. Les questions liées au sexe jouent aussi un rôle considérable. Les ménages, dont la charge revient à la femme, ont généralement un accès restreint aux engrais en raison des contraintes financières ou parce que les systèmes de vulgarisation et les organisations de commercialisation les ignorent. Afin de faire face efficacement aux différents problèmes de diminution de la fertilité du sol, l'intégration des disciplines (pédologie, agronomie, élevage, économie et sociologie) est un préalable, comme l'est d'ailleurs l'intégration des sciences et la connaissance des agriculteurs.

La gestion intégrée des éléments nutritifs, définie comme l'utilisation rationnelle des réserves et des flux en éléments nutritifs permettant d'atteindre des niveaux de

production satisfaisants et durables du point de vue environnemental, économique et socioculturel, apparaît comme la voie à suivre. Elle symbolise une évolution décisive des essais traditionnels d'engrais visant à augmenter la production vers des solutions globales dans le domaine de l'intégration des engrais organiques et minéraux, de l'intégration du bétail, de la conservation des sols et des eaux, du marketing et des politiques agricoles.

Méthodologie

L'approche NUTMON est caractérisée par deux phases: la phase de diagnostic et la phase de développement (figure 12). Les aspects liés à la multidisciplinarité et à l'intégration des systèmes de connaissance sont cruciaux à l'ensemble des deux phases.

Phase de diagnostic

La phase de diagnostic est réalisée au niveau de l'exploitation agricole car les décisions de gestion sont prises à ce niveau. L'objectif de la phase de diagnostic consiste en une analyse participative de la situation actuelle sur l'appauvrissement en éléments nutritifs du sol et la performance économique. Elle exige l'utilisation d'une série d'instruments, précédée de techniques participatives telles que l'évaluation rurale participative (ERP) et les cartes des flux de ressources élaborées de manière participative. Les instruments de la méthode NUTMON jouent un rôle central au sein de cette phase car ils permettent de quantifier les flux d'éléments nutritifs entre le sol, les cultures et le bétail. Les flux sont exprimés en kilogrammes de N, P et K (flux d'éléments nutritifs), mais aussi en termes monétaires (flux financiers). Les flux d'éléments nutritifs quantifiés indiquent les activités qui consomment les éléments nutritifs et qui les accumulent, et comment et où ces éléments nutritifs circulent d'une activité à l'autre. Les flux financiers quantifiés donnent un aperçu de la rentabilité des activités (cultures, bétail, étangs à poissons et fosse à compost) et de la demande de travail.

Les prélèvements et les analyses du sol offrent des renseignements essentiels sur l'état en éléments nutritifs à un instant donné. Un large éventail d'outils participatifs peut être utilisé pour recueillir et analyser les perceptions des autres acteurs concernés par les problèmes de fertilité du sol. Les résultats quantitatifs de la méthode NUTMON, associés à l'information souvent qualitative des autres parties intéressées, fournissent une base solide à un diagnostic adéquat. Les aboutissements de cette phase sont les suivants: réserves et flux en éléments nutritifs quantifiés, indicateurs de performance financière, diagrammes des flux, classification des problèmes et des solutions envisageables et descriptions de la gestion de l'exploitation agricole au cours du temps. Au cours de ce processus apparaissent les perceptions et les stratégies des différents acteurs intéressés (agriculteurs, chercheurs, vulgarisateurs) et les limites biophysiques et économiques, créant une compréhension commune du problème.

Phase de développement

La phase de développement peut s'effectuer à deux échelles différentes. Au niveau de l'exploitation agricole, un processus d'élaboration de technologie participative est lancé afin de préparer des technologies qui pourront répondre aux problèmes identifiés lors de la phase de diagnostic. Sur la base du diagnostic, les agriculteurs accorderont leurs priorités à certaines technologies qui seront testées au sein de l'exploitation agricole. A titre d'exemple, les bilans négatifs en éléments nutritifs provoqués par d'importants flux sortants d'érosion et de lessivage pourront exiger l'intervention de technologies de conservation des sols et des eaux. Les situations au cours desquelles de faibles niveaux d'application d'intrants ont entraîné des bilans négatifs en éléments nutritifs pourront exiger des modifications de la commercialisation afin de rendre les intrants plus attrayants.

La méthode NUTMON joue un rôle important quant au suivi et à l'évaluation de l'impact des technologies appliquées car elle offre une information scientifique et quantitative. De manière similaire à la phase de diagnostic, d'autres outils et méthodes sont appliqués afin de parvenir à une évaluation de l'impact par les agriculteurs eux-mêmes (De Jager, Nandwa et Okoth, 1998; Vlaming, Gitari et Van Wijk, 1997). Au niveau régional, un processus participatif d'élaboration des politiques peut être lancé. Les interventions au niveau des politiques elles-mêmes sont définies au cours des discussions entre les agriculteurs, les scientifiques et les décideurs politiques.

Tout au long des deux phases, la connaissance et l'expérience sont issues aussi bien des systèmes de savoir local que de la connaissance purement scientifique afin d'atteindre les solutions les plus appropriées. Le processus d'intégration de ces deux systèmes a pour résultat un renforcement des capacités de recherche en faveur des agriculteurs (pour apprendre à mener une recherche appliquée) et des chercheurs (pour améliorer la connaissance relative aux pratiques de gestion des exploitations agricoles).

La méthode NUTMON

La méthode NUTMON est composée de quatre modules et de deux bases de données qui facilitent le suivi des éléments nutritifs au niveau des champs de chaque agriculteur et des exploitations agricoles.

Les quatre modules sont composés de:

- une série de questionnaires chargée de recueillir les informations nécessaires et spécifiques aux exploitations agricoles concernant la gestion, l'environnement de l'exploitation agricole, les familles d'agriculteurs, les sols et le climat;
- un module de saisie de données facilitant la saisie informatique des informations issues des questionnaires;
- un module de traitement mémorisant les informations qui ne sont pas spécifiques des cultures, des résidus de cultures, des animaux, des intrants et des extrants;
- un module de traitement des données chargé de calculer les flux et les bilans en éléments nutritifs et les indicateurs économiques, sur la base de données spécifiques aux exploitations agricoles issues des questionnaires et des données générales provenant de la base de données et utilisant des hypothèses.

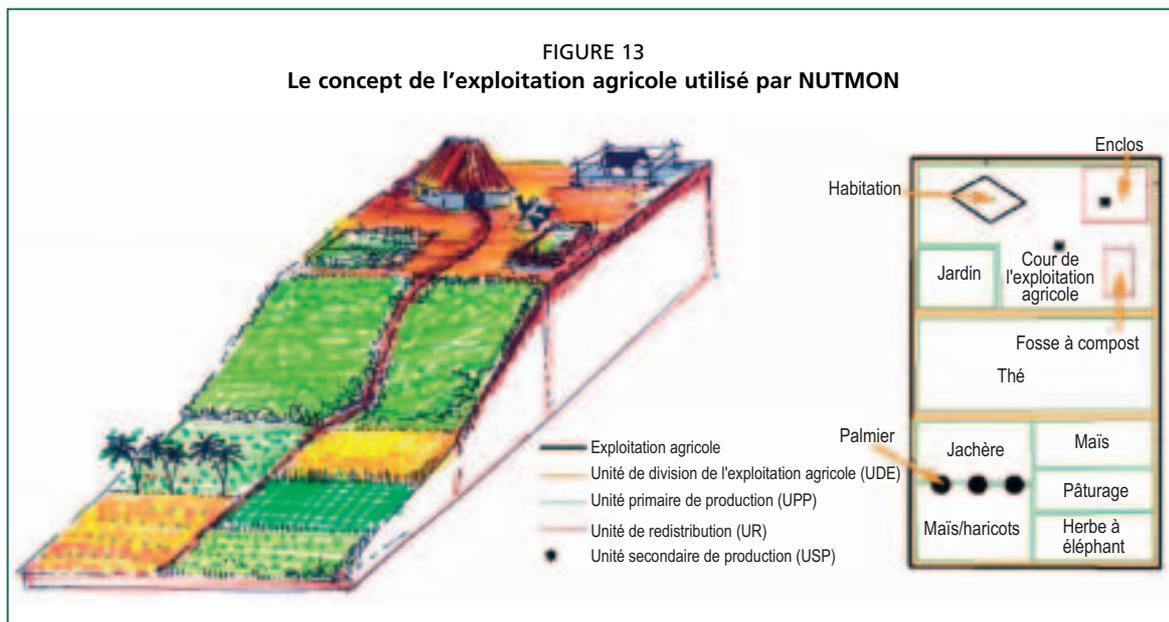
Les deux bases de données sont composées de:

- une base de données contenant les informations qui ne sont pas spécifiques à l'exploitation agricole, comme par exemple les teneurs en éléments nutritifs des produits récoltés et de produits d'origine animale, les paramètres sur les cultures et le bétail ainsi que les facteurs d'étalonnage des unités de mesure;
- une base de données contenant des informations spécifiques à l'exploitation agricole et une base de données renfermant l'information d'un ensemble d'exploitations agricoles faisant partie de l'étude.

Cadre conceptuel

Comme la complexité des exploitations agricoles ne permet pas toujours de quantifier les flux et les réserves d'éléments nutritifs, un cadre conceptuel a été élaboré. Le cadre permet de simplifier la réalité de façon telle que les réserves et les flux principaux d'éléments nutritifs soient inclus et que les flux secondaires soient négligés. Le cadre est composé de quatre composantes principales:

- les unités de division de l'exploitation agricole, qui sont des champs continus de l'exploitation agricole; (UDEs)
- les réservoirs en éléments nutritifs, tels que les cultures, le bétail et les fosses à compost;
- les autres entités qui jouent un rôle dans la gestion de l'exploitation agricole (les sols, le climat et le marché);



- les flux d'éléments nutritifs et les flux financiers, par exemple les produits récoltés, les engrais minéraux et la main-d'œuvre.

Les limites de l'exploitation agricole coïncident avec les frontières physiques. La limite la plus inférieure du système correspond à la profondeur à laquelle les éléments nutritifs lessivés sont supposés être perdus du système.

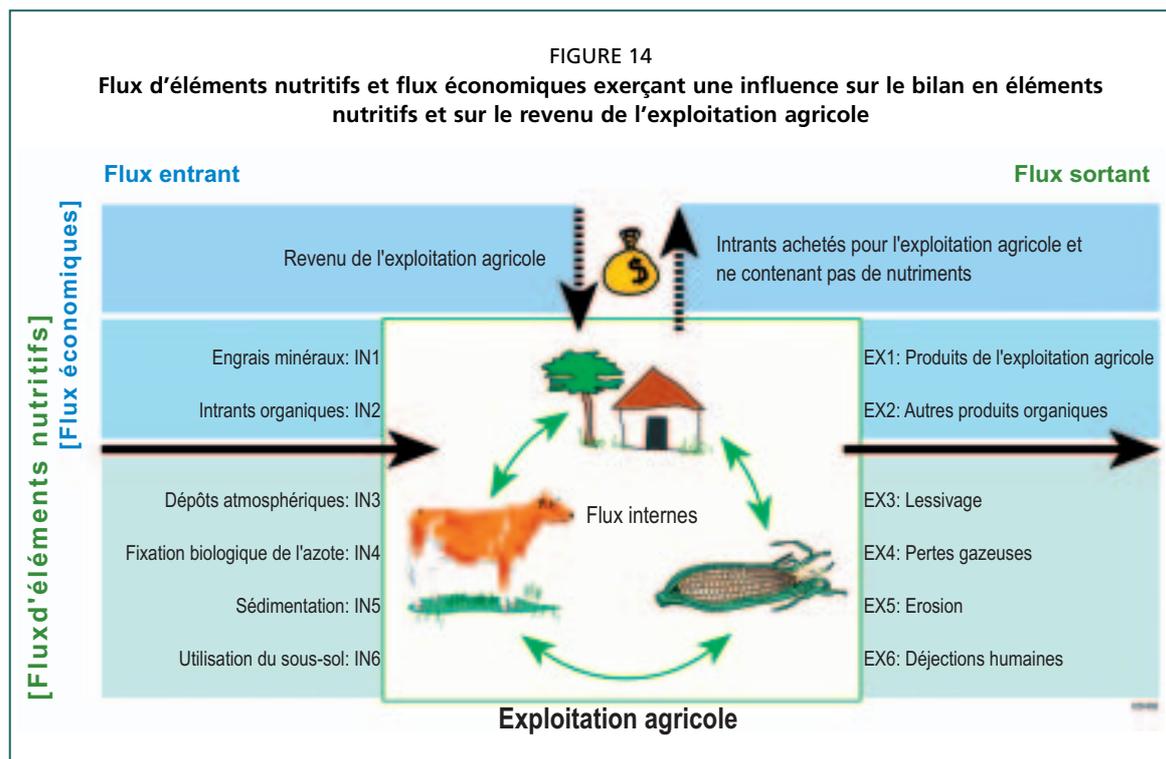
Le concept de l'exploitation agricole (figure 13) fait une distinction entre les unités de division de l'exploitation agricole (UDEs), les unités primaires de production (UPPs), les unités de redistribution (URs) et les unités secondaires de production (USPs). Une UDE est un champ ininterrompu au sein de l'exploitation agricole, supposé disposer de propriétés homogènes du sol, d'inclinaison, de régime des crues et de régime foncier. Les UDEs sont définies car les caractéristiques du sol et des terres sont déterminantes du flux d'éléments nutritifs (par exemple le lessivage et l'érosion). Une UPP représente l'activité d'une culture qui se compose d'une ou de plusieurs cultures poussant de façon délibérée au sein d'une même exploitation agricole. Elle peut inclure les cultures pérennes ou annuelles, le pâturage ou la jachère. Une UR correspond à un emplacement au sein d'une exploitation agricole où les éléments nutritifs sont recueillis ou accumulés et redistribués, par exemple pour les abris pour animaux, les enclos, les étangs à poissons, les fosses à compost et les latrines. Une USP est défini comme un groupe composé d'animaux de la même espèce/race et dirigé par un agriculteur.

Quantification des flux d'éléments nutritifs

La figure 14 représente les flux entrants et sortants mis en jeu au niveau de l'exploitation agricole selon NUTMON. Ces flux sont évalués de manière quantitative par quatre méthodes: (i) en questionnant directement l'agriculteur; (ii) en utilisant des fonctions de transfert; (iii) selon le mode d'élevage; et (iv) en utilisant des hypothèses. Tous les flux d'éléments nutritifs sont déterminés en kilogrammes d'éléments nutritifs par hectare et par an.

IN1 (engrais minéraux) est déterminé en questionnant l'agriculteur et en combinant les quantités appliquées avec les teneurs en éléments nutritifs issues de la base de données.

IN2 (intrants d'origine organique) est déterminé en questionnant l'agriculteur et en combinant les quantités appliquées avec les teneurs en éléments nutritifs issues de la base de données.



IN3 (dépôts atmosphériques) est déterminé par le biais de trois fonctions de transfert

$$\text{N: } IN3 = 0,14 \times P$$

$$\text{P: } IN3 = 0,023 \times P$$

$$\text{K: } IN3 = 0,092 \times P$$

où P = précipitations annuelles (mm/an).

IN4 (FBA) prend en compte la fixation symbiotique et non symbiotique de l'azote. La fixation non symbiotique de l'azote est déterminée par la moyenne des précipitations annuelles P :

$$IN4 = 2 + (P - 1\,350) \times 0,005$$

La fixation symbiotique de l'azote est supposée être spécifique aux cultures et est exprimée en pourcentage du prélèvement total d'azote des légumineuses (annuelles ou pérennes). Le prélèvement total d'azote est la somme de la quantité d'azote contenue dans le produit de la culture plus la quantité d'azote contenue dans les résidus de culture.

IN5 (sédimentation) correspond à la quantité d'eau d'irrigation multipliée par la teneur en éléments nutritifs de l'eau d'irrigation.

IN6 (utilisation du sous-sol) est normalement ignoré en raison des difficultés à déterminer le flux et de sa faible contribution au bilan total en éléments nutritifs.

EX1 (produits agricoles) est obtenu à partir des questionnaires et est multiplié par les valeurs de teneur en éléments nutritifs des cultures provenant de la base de données.

EX2 (autres extrants organiques) est également obtenu à partir des questionnaires et les quantités sont multipliées par les valeurs de teneur en éléments nutritifs des cultures provenant de la base de données.

EX3 (lessivage) est déterminé par l'intermédiaire des fonctions de transfert. Pour le lessivage de l'azote, il est possible d'utiliser le 'modèle De Willigen 2000' ou le 'modèle Smaling 1993'. Le modèle De Willigen 2000 se fonde sur une recherche bibliographique considérable (De Willigen, 2000).

$$EX3 = 21,37 + (P/A \times L) \times (0,0037 \times N_f + 0,0000601 \times O_c - 0,00362 \times N_p)$$

où:

- P = précipitations annuelles (mm/an),
 A = teneur en argile (pour cent),
 L = profondeur d'enracinement (m),
 N_f = azote contenu dans les engrais minéraux,
 O_c = carbone organique du sol (pour cent),
 N_p = prélèvement d'azote par la culture (kg/ha/an).

Le modèle Smaling 1993 est une simple fonction de transfert qui dépend de l'azote contenu dans le sol et dans les engrais (Smaling, 1993):

$$\begin{aligned} EX3 &= (N_s + N_f) \times (0,021 \times P - 3,9)/100 & A < 35 \text{ pour cent} \\ EX3 &= (N_s + N_f) \times (0,014 \times P + 0,71)/100 & 35 \text{ pour cent} < A < 55 \text{ pour cent} \\ EX3 &= (N_s + N_f) \times (0,0071 \times P + 5,4)/100 & A > 55 \text{ pour cent} \end{aligned}$$

où:

- N_s = quantité d'azote minéralisé présente dans les premiers 20 cm du sol,
 N_f = quantité d'azote appliqué avec les engrais minéraux et organiques,
 P = précipitations annuelles (mm/an),
 A = quantité d'argile de la couche arable (pour cent).

Pour le lessivage du potassium, seul le modèle Smaling 1993 peut être utilisé:

$$\begin{aligned} EX3 &= (K_e + K_f) \times (0,00029 \times P + 0,41)/100 & A < 35 \text{ pour cent} \\ EX3 &= (K_e + K_f) \times (0,00029 \times P + 0,26)/100 & 35 \text{ pour cent} < A < 55 \text{ pour cent} \\ EX3 &= (K_e + K_f) \times (0,00029 \times P + 0,11)/100 & A > 55 \text{ pour cent} \end{aligned}$$

où:

- K_e = potassium échangeable (cmol/kg),
 K_f = quantité de potassium appliquée avec les engrais minéraux et organiques,
 P = précipitations annuelles (mm/an),
 A = quantité d'argile de la couche arable (pour cent).

EX4 (pertes gazeuses) est composé des pertes gazeuses en azote provenant du sol et des pertes gazeuses en azote issues du stockage des intrants organiques. Les pertes gazeuses en azote provenant du sol sont calculées en fonction du pourcentage en argile et des précipitations:

$$EX4 = (N_s + N_f) \times (-9,4 + 0,13 \times A + 0,01 \times P)$$

où:

- N_s = azote minéralisé présent dans la zone racinaire (kg/ha),
 N_f = azote appliqué avec les engrais minéraux et organiques (kg/ha),
 A = quantité d'argile (pour cent),
 P = moyenne des précipitations annuelles (mm/an).

Les pertes gazeuses en azote relatives au stockage des intrants organiques (fumier et compost) sont calculées par l'intermédiaire d'un pourcentage défini par l'utilisateur.

EX5 (érosion) est calculé par l'EUPT. Une perte hypothétique en terre par UDE est calculée en fonction de l'inclinaison, de la longueur de la pente, des précipitations, des caractéristiques du sol et de l'existence de mesures de conservation du sol. Pour chaque UPP, la perte hypothétique en terre (en kilogrammes par hectare et par an) est multipliée par un facteur de culture de couverture, par la composition du sol en éléments nutritifs et par un facteur d'enrichissement.

EX6 (déjections humaines) est calculé sur la base d'une quantité définie par l'utilisateur. Les excréments humains peuvent être répartis dans une UPP ou une UR ou peuvent être entièrement perdus dans le cas d'une latrine profonde.

Un modèle spécifique pour le bétail a été développé afin d'estimer: (i) la quantité et le type d'alimentation consommée par le bétail; (ii) la quantité et la composition du fumier; et (iii) la distribution du fumier produit parmi les différentes unités de l'exploitation agricole. Le modèle peut s'appliquer à tous les types d'animaux, mais est plus élaboré pour les bovins. Le modèle ne fait pas de différence entre les éléments nutritifs du fumier et des urines.

Résultats

La méthodologie NUTMON a été utilisée pour plusieurs études et projets et de nombreux exemplaires ont été distribués aux institutions situées dans les tropiques. Les descriptions de projets et les résultats sont disponibles sur le site internet NUTMON (www.nutmon.org). Les résultats du suivi des éléments nutritifs dans trois districts du Kenya sont exposés dans deux publications: Van den Bosch *et al.* (1998) et De Jager, Nandwa et Okoth (1998). La durabilité des systèmes de gestion des exploitations agricoles, disposant de faibles quantités d'intrants provenant de l'extérieur, a été évaluée grâce à l'approche NUTMON pour un cas d'étude au Kenya (De Jager *et al.*, 2001). Les projets VARINUTS (SC-DLO *et al.*, 2000) ont utilisé l'approche NUTMON afin de déterminer les variations de gestion de la fertilité des sols dans cinq ZAEs de la région Embu au Kenya.

Analyse

Bien que l'approche NUTMON ait été développée au niveau de l'exploitation agricole, elle est fondée sur l'approche élaborée par Stoorvogel et Smaling (1990). Ceci signifie que NUTMON peut également être utilisé comme un outil permettant de contrôler les flux d'éléments nutritifs au sein des exploitations agricoles. La méthodologie a évolué en tant que logiciel disposant d'une base de données et de questionnaires. Par conséquent, l'utilisation de la méthodologie s'est généralisée à de nombreux projets opérant au niveau de la ferme. Cependant, les besoins importants en données rendent le modèle plus difficilement utilisable pour les inventaires rapides.

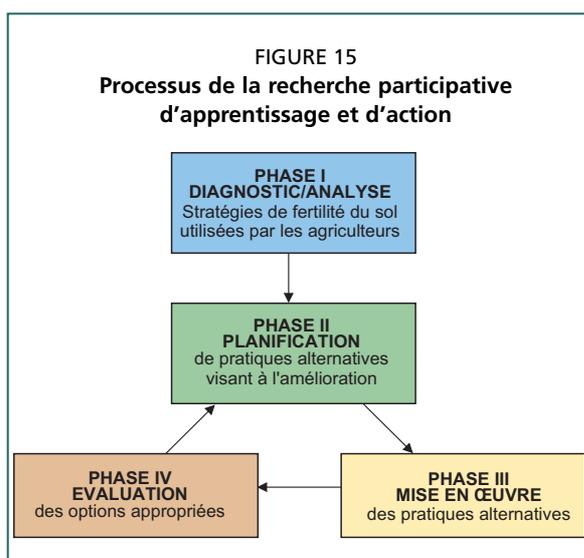
Gestion participative des éléments nutritifs dans le sud du Mali

La communauté agropastorale du sud du Mali est caractérisée par des systèmes agricoles distincts et par la présence de différentes ethnies. La dépendance variable vis-à-vis du bétail, des engrais minéraux et le pâturage implique des bilans en éléments nutritifs considérablement différents. Bien que les calculs de bilan en éléments nutritifs soient indispensables, les outils utilisés sont, d'un point de vue méthodologique, complexes. L'étude en question donne un aperçu des difficultés potentielles apparaissant suite aux hypothèses développées à propos des processus intervenant dans le sol mais aussi des limites temporelles et géographiques du système (Ramisch, 1999).

La zone d'étude, le village de Lanfiéla au sud du Mali, est caractérisée par des sols de limon sableux et des précipitations relativement élevées (1 100 mm). D'importants troupeaux de bétail vivent au sein de la zone étudiée, dont l'agriculture est orientée sur le coton et sur la traction animale. La zone d'étude a été divisée en trois groupes: le village, le hameau et le Fulani. Les villages font référence à un amas de quartiers interconnectés localisé au centre de la plaine cultivée; le Fulani se rapporte aux résidents semi sédentaires de l'ethnie Fulani; et le hameau est défini comme le lieu d'habitation des agriculteurs qui ne sont pas issus de l'ethnie Fulani et dont les champs cultivés sont disposés autour de ce hameau.

Méthodologie

L'approche utilisée pour le calcul du bilan en éléments nutritifs est basée sur celle de Stoorvogel et Smaling (1990), mais à laquelle une nouvelle composante participative a été ajoutée. L'approche en question est intitulée Recherche participative d'apprentissage et d'action (RPAA) (Defoer, 2000; Defoer, 2002). Elle est composée de quatre phases (figure 15); le cycle est rythmé par la saison des cultures et crée la base de l'engagement à long terme entre les agriculteurs et les chercheurs. L'approche RPAA peut être comparée avec celle utilisée pour les champs écoles d'agriculteurs (CEA). Cependant, l'approche CEA ne fait pas spécifiquement face à la diversité et ne tire pas parti de l'engagement à long terme des communautés agricoles. L'approche RPAA est basée sur quatre principes applicables à chacune des phases:



Source: Defoer, 2002.

- RPAA est une approche orientée sur la communauté.
- RPAA répond aux questions liées à la diversité.
- RPAA travaille avec des échantillons représentatifs d'agriculteurs.
- RPAA tire parti des commentaires/résultats.

Deux niveaux d'analyse sont distingués: la communauté du village ou le groupe d'agriculteurs, et l'exploitation agricole. La phase de diagnostic est composée de huit étapes:

- Réunions préliminaires de la communauté (au niveau de la communauté).
- Analyse du système d'utilisation des terres du village (au niveau du groupe).
- Analyse des différences de gestion (au niveau du groupe).
- Schémas des organisations du village (au niveau du groupe).
- Sélection des agriculteurs (au niveau du groupe).
- Formation d'un comité paysan (au niveau du groupe).
- Carte des flux de ressources de l'exploitation agricole (au niveau de l'exploitation agricole).
- Réunion de clôture de la communauté (au niveau de la communauté).

Un des principaux éléments de la phase de diagnostic consiste en l'élaboration d'une carte des flux de ressources par les agriculteurs eux-mêmes. Cette carte représente les champs des agriculteurs ainsi que d'autres éléments de l'exploitation agricole, tels que les enclos et les fosses à compost (figure 16). Les flux de ressources entre les champs et les autres éléments de l'exploitation agricole sont dessinés comme des ressources entrant ou quittant l'exploitation agricole, par exemple les produits récoltés et les engrais minéraux. Les cartes des flux de ressources offrent un point de départ pour une évaluation et un suivi permanents des champs tout au long de la saison.

Les étapes de la phase de planification sont les suivantes:

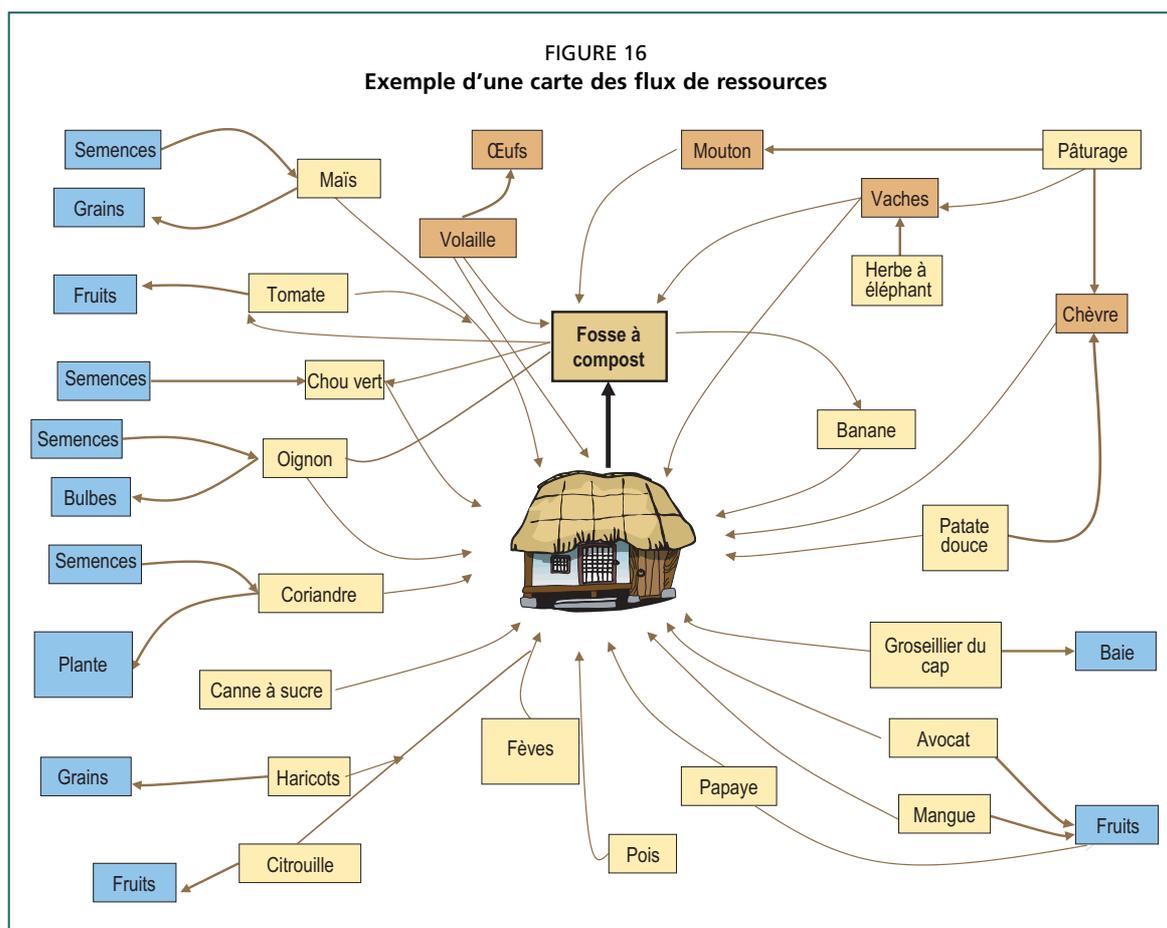
- Ateliers d'agriculteurs (au niveau de la communauté).
- Visites d'échange entre agriculteurs (au niveau du groupe).
- Schéma de planification (au niveau de l'exploitation agricole).
- Plan d'action du comité (au niveau de la communauté).
- Réunion de clôture de la phase de planification (au niveau de la communauté).

Au cours de la phase de mise en œuvre, les agriculteurs sont aidés par:

- Sessions de formation pour agriculteurs (au niveau du groupe).
- Réunion de conception des essais (au niveau du groupe).
- Démonstration du plan (au niveau du groupe).
- Suivi des essais (au niveau de l'exploitation agricole)
- Visite sur le terrain (au niveau du groupe).
- Formation d'agriculteurs par d'autres agriculteurs (au niveau du groupe).
- Gestion des résultats des essais (au niveau du groupe).
- Journée de démonstration (au niveau de la communauté).

La phase d'évaluation, la dernière du processus RPAA, est composée de trois étapes:

- Réunion préliminaire d'évaluation (au niveau de la communauté).
- Schéma des activités exécutées (au niveau de l'exploitation agricole).
- Évaluation du plan d'action et réunion de clôture de la phase d'évaluation (au niveau du groupe/communauté).



Le modèle du bilan en éléments nutritifs

Le modèle établit les excédents ou les déficits nets en éléments nutritifs en mesurant et en additionnant l'ensemble des ressources entrant ou sortant d'une parcelle donnée (tableau 17). Les exportations influencées par les modalités de gestion concernent les résidus de récolte. Ceci implique soit (i) stocker les résidus pour l'alimentation du bétail ou la litière; (ii) préparer directement le compost avec les autres déchets organiques; ou (iii) les brûler sur les champs (immédiatement après la récolte ou plus tard au cours de la saison). Les résidus non brûlés laissés sur les champs sont souvent broutés sur place par le bétail et peuvent alors être décomposés par l'intermédiaire des termites ou d'autres processus. Lorsque cela était approprié, l'étude a fait la distinction entre le pâturage des animaux de l'exploitation agricole étudiée et le pâturage des animaux provenant d'autres exploitations agricoles. Le pâturage par les animaux d'une exploitation agricole est considéré comme un transfert gardant potentiellement les éléments nutritifs au sein d'un même champ-troupeau-ferme, alors que le pâturage effectué par d'autres animaux, exporte les éléments nutritifs hors de ce système.

Les flux entrants du bilan en éléments nutritifs, liés aux types de gestion, concernent tous les mouvements de matière organique des enclos à bétail ou des fosses à compost vers les champs, l'application d'engrais minéraux ainsi que le fumier déposé sur les champs par les animaux des enclos durant la saison sèche. Le 'type de gestion' a aussi un impact sur le mouvement du bétail dans les champs, car il détermine les éléments nutritifs introduits par le passage des animaux à l'herbage qui utilisent les champs comme parcours. Les transferts dans l'environnement sont liés au climat, tout particulièrement les intrants provenant des dépôts atmosphériques (poussière et précipitations), la fixation non symbiotique et l'altération des matériaux d'origine. Les

TABLEAU 17
Variables prises en compte pour les calculs de bilan en éléments nutritifs

	Extrants	Intrants
Gestion	EX1 Produits récoltés	IN1 Engrais minéraux
	EX2 Résidus de cultures	Complexe (NPK + SB)
	Stockage	Urée
	Compostage	IN2 Transporté sur le champ
	Pâturage sur place	Compostage
	Brûlés	Déchets du ménage
	Abandonnés sur les champs	Enclos à fumier
		Fumier déposé par les animaux dans les enclos
		Fumier déposé par les animaux à l'herbage
Environnement	EX3 Lessivage	IN3 Dépôts atmosphériques
	EX4 Dénitrification & volatilisation	IN4 Fixation biologique
	EX5 Erosion	IN5 Matériaux d'origine (sédimentation)

extrants sont également gouvernés par des facteurs qui ne concernent pas les modalités de gestion, mais qui interagissent avec les transferts connexes à la gestion. Par exemple, l'érosion, tout en étant influencée par l'inclinaison, le type de sol et les précipitations, est également influencée par la culture de couverture et la gestion.

Les pertes en azote par lessivage et les pertes gazeuses en azote (via la volatilisation et la dénitrification) sont également fonction des quantités d'éléments nutritifs appliquées. En raison de contraintes logistiques rencontrées sur le terrain, ces transferts ont été estimés par les critères indiqués dans le tableau 18.

Résultats

Le tableau 19 récapitule les bilans en éléments nutritifs des parcelles cultivées. Les bilans azotés et potassiques ont atteint des chiffres significativement plus élevés dans les hameaux que dans le village. Les bilans les plus importants se sont produits pour les Fulanis. Ce système a offert de bons résultats car les parcelles cultivées étaient de petite dimension et les troupeaux de bétail étaient importants. Par conséquent, les troupeaux pouvaient apporter aux parcelles cultivées des quantités abondantes de fumier. Les agriculteurs des hameaux ont utilisé des quantités d'engrais minéraux plus importantes que les villageois, et comme leurs habitations étaient contiguës à leurs champs, les agriculteurs des hameaux ont ainsi pu mieux entretenir leurs cultures et atteindre de

TABLEAU 18
Valeurs moyennes utilisées pour les calculs des transferts des éléments nutritifs dans l'environnement

Transfert	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
IN3 – Dépôts atmosphériques	5 kg/ha	1,2 kg/ha	3,5 kg/ha
IN4 - Fixation biologique (symbiotique)	50% de prélèvement		
IN4 - Fixation biologique (non symbiotique)	2 kg/ha		
IN5 – Altération		1 kg/ha	5 kg/ha
EX3 - Lessivage			
Coton	7 kg/ha	1 kg/ha	16 kg/ha
Légumineuse	15 kg/ha	1 kg/ha	16 kg/ha
Maïs	6 kg/ha	1 kg/ha	16 kg/ha
Mil/sorgho	1,5 kg/ha	1 kg/ha	16 kg/ha
EX4 - Volatilisation	(Sols trop acides)		
EX4 - Dénitrification	10 kg/ha + 30% appliqué - 10% de prélèvement		
EX5 - Erosion	0,76 kg/tonne sédiment	0,26 kg/tonne sédiment	0,46 kg/tonne sédiment

TABLEAU 19
Bilans en éléments nutritifs des parcelles des trois groupes d'agriculteurs

	Echantillon tout entier	Village	Hameaux	Fulani
	(256 ha)	(n = 191)	(n = 59)	(n = 13)
	(kg/ha)			
N	-8,2	-11,9	-4,7	23,3
P ₂ O ₅	19,5	26,5	35,1	39,4
K ₂ O	8,9	3,3	20,8	74,5

meilleurs rendements. Par conséquent, les résidents des hameaux pourraient consacrer une proportion importante de leur revenu de récolte de coton à l'achat d'engrais.

Analyse

Le bilan en éléments nutritifs s'est basé sur celui de Stoorvogel et Smaling (1990) et comprenait l'ensemble des cinq flux entrants et sortants. Le trait innovateur de cette étude consistait en l'approche participative, car l'accent a été mis sur les perceptions des groupes d'agriculteurs et non pas sur les INs et EXs en tant que tels. De plus, les agriculteurs ont eux-mêmes déterminé leurs réserves en éléments nutritifs et le schéma des flux.

Bilans en éléments nutritifs pour la gestion des niches agroécologiques

Gestion de la fertilité des sols dans le sud de l'Éthiopie

L'objectif était d'étudier les bilans d'éléments nutritifs du sol à des échelles de petite dimension. De précédents rapports avaient indiqué des rendements en diminution, et ceux-ci avaient été attribués par les agriculteurs à une diminution de la fertilité des sols. L'étude visait à découvrir s'il existait des preuves de bilans négatifs des principaux éléments nutritifs des plantes (N et P) dans la région, et si ce bilan était lié à la ZAE et au statut socioéconomique de l'agriculteur (Elias, Morse et Belshaw, 1998).

Quatre exploitations agricoles ont été sélectionnées dans chacune des deux ZAEs (hautes-terres et basses-terres), représentant quatre groupes socioéconomiques d'agriculteurs en termes de ressources: riche, moyen, pauvre et très pauvre. La différenciation des ménages d'agriculteurs a été réalisée par les agriculteurs grâce à un outil de classification des richesses basé sur des critères locaux et essentiellement centré sur la possession de bœuf de labour et sur la taille du troupeau de bétail. La possession de bœuf de labour représente le principal indicateur local de richesse et est le critère fondamental à utiliser lors de toute tentative de classification des ménages d'agriculteurs. La différenciation des ménages a été:

- Riche: les agriculteurs possédant plus de deux bœufs et un nombre de têtes de bétail non négligeable.
- Moyen: les agriculteurs possédant deux bœufs et environ la moitié du nombre de têtes de bétail du groupe riche.
- Pauvre: les agriculteurs possédant ou partageant un bœuf et ne possédant pas de vache reproductrice.
- Très pauvre: les agriculteurs ne possédant aucune tête de bétail, mais possédant à titre occasionnel une ou deux chèvres ou moutons (ils empruntent les animaux comme force de traction ou pour la production de fumier).

Méthodologie

Afin d'évaluer la diminution de la fertilité du sol, cette étude a utilisé l'approche du bilan en éléments nutritifs plutôt que celle techniquement plus difficile qui consiste à comparer les réserves d'éléments nutritifs dans le sol (Pieri, 1983). Grâce à l'approche du bilan en éléments nutritifs, les quantités entrant et sortant du sol sont estimées et le

bilan (intrant-extrant) est ainsi calculé. Les bilans ont été calculés pour l'ensemble des champs des différentes exploitations agricoles. Cette étude a seulement considéré N et P car ce sont les deux éléments nutritifs identifiés comme particulièrement insuffisants dans les sols de Kindo Koisha. Les bilans ont été calculés en combinant les quatre flux entrants aux cinq sortants. Les flux d'intrants étaient les suivants:

- engrais minéraux (IN1);
- matière organique (IN2) y compris le fumier et les déchets provenant des ménages d'agriculteurs (IN2a) et les couvertures de feuilles mortes (litière) (IN2b);
- dépôts atmosphériques (IN3);
- FBA (IN4).

La sédimentation, identifiée comme IN5 dans le modèle d'origine, n'est pas pertinente pour cette étude car il n'y a pas de plans d'irrigation et de champs inondés.

Les flux d'extrants étaient les suivants:

- exportation des produits récoltés (EX1);
- exportation des résidus de récolte (EX2);
- lessivage (EX3);
- dénitrification (EX4);
- érosion par l'eau (EX5).

Les huit agriculteurs participant aux cas d'études ont utilisé des diagrammes afin d'identifier les flux principaux d'éléments nutritifs qui selon eux entrent et sortent de leurs exploitations agricoles. Les flux ont été mesurés sur une période de production afin de préparer une fiche sur le bilan en éléments nutritifs pour chaque champ. Le calcul de la quantité d'azote et de phosphore présente dans les flux entrants et sortants a été réalisé en combinant différentes méthodes: des mesures sur le terrain, l'utilisation de relations empiriques quantitatives (par exemple les fonctions de transfert), et des hypothèses basées sur des données secondaires et provenant de diverses sources. Les tableaux 20 et 21 récapitulent le type de données nécessaires et la méthode permettant de quantifier chacune des fonctions d'intrant et d'extrant.

Pour l'azote et le phosphore, des données de base ont été rassemblées telles que le type d'engrais, de fumier, de déchets des ménages ruraux et de couverture de feuilles mortes (litière) ainsi que leurs quantités respectives appliquées. Le nombre de sacs de fumier transporté ainsi que le site d'application ont été contrôlés quotidiennement et le

TABLEAU 20

Données et méthode de quantification pour les quatre flux entrants utilisés pour le calcul des bilans en N et P

Intrant	Code et éléments nutritifs	Données nécessaires	Méthode de quantification
Engrais minéraux	IN1 (N & P)	Type d'engrais appliqué	Analyse sur le terrain
		Quantité d'engrais appliquée	Analyse sur le terrain
Fumier	IN2a (N & P)	Quantité de fumier appliquée	Analyse sur le terrain
		Composition en éléments nutritifs du fumier	Analyse de laboratoire
Couverture de feuilles mortes (litière)	IN2b (N & P)	Quantité de couvertures de feuilles mortes ramassée	Estimation de l'agriculteur
		Types d'arbres utilisés	Observation sur le terrain
		Teneur en éléments nutritifs des feuilles mortes	Analyse de laboratoire
Dépôts	IN3 (N & P)	Moyenne des précipitations annuelles	Registres des précipitations
		Dépôts de N et P	Fonctions de transfert
FBA	IN4 (seulement N)	Espèces légumineuses	Observation sur le terrain
		Rendement des graines et des résidus de légumineuses	Analyse sur le terrain
		Teneur en éléments nutritifs des graines et résidus	Analyse de laboratoire
		Pourcentage du prélèvement attribué à la fixation symbiotique	Données secondaires

TABLEAU 21

Données et méthode de quantification pour les cinq flux sortants utilisés pour le calcul des bilans en N et P

Extrant	Code et éléments nutritifs	Données nécessaires	Méthode de quantification
Produit récolté	EX1 (N & P)	Rendement des cultures	Analyse sur le terrain
		Teneur en éléments nutritifs des produits	Mélange d'analyse de laboratoire et d'estimations
Résidus des cultures	EX2 (N & P)	Rendement des résidus	Analyse sur le terrain
		Usage des résidus	Observation sur le terrain
		Teneur en éléments nutritifs des résidus	Mélange d'analyse de laboratoire et d'estimations
Lessivage & dénitrification	EX3 & EX4 (Seulement N)	Précipitation moyenne	Registres des précipitations
		N issu des engrais appliqués	Analyse sur le terrain
		N issu du fumier appliqué	Registres des analyses sur le terrain
		Lessivage et dénitrification de N du sol et de l'azote appliqué	Estimation (fonction de transfert)
Erosion	EX5 (N & P)	Moyenne des précipitations annuelles	Registres des précipitations
		Erodibilité (K)	Données secondaires
		Longueur de la pente (L)	Estimation basée sur des analyses sur le terrain
		Inclinaison de la pente (S)	Données secondaires
		Couvert végétal (C)	Données secondaires
		Facteur de gestion (P)	Données secondaires
		Teneur en éléments nutritifs des sédiments	Données secondaires

poids frais de fumier par sac a été mesuré. Des échantillons représentatifs de fumier frais provenant des enclos à animaux ont été rassemblés et analysés par l'Institut international de recherche zootechnique (ILRI) afin de calculer les teneurs en eau et la composition en azote et en phosphore. Les échantillons de fumier ont été, préalablement aux tests, séchés au four à une température de 105°C et les teneurs en eau qui sont de 60 pour cent pour les hautes-terres et de 50 pour cent pour les basses-terres ont permis de convertir les apports de fumier en apports d'éléments nutritifs.

Les données locales de déposition atmosphérique n'ont pas été disponibles et les dépôts atmosphériques d'azote et de phosphore ont donc été calculés comme la racine carrée de la moyenne des précipitations annuelles d'après l'équation de régression développée par Stoorvogel et Smaling (1990). Les coefficients de régression ont été de 0,14 pour N et de 0,023 pour P. Seul le haricot a fourni un apport en azote à travers la fixation biologique (IN4). Les rendements de graines et de résidus du haricot ont été mesurés sur le terrain et leur composition en éléments nutritifs a été déterminée par analyse chimique à l'ILRI. Il a été supposé que 50 pour cent des besoins en azote du haricot était issu de la fixation biologique, comme présumé par Smaling, Stoorvogel et Windmeijer (1993) qui ont étudié cette culture sur les nitosols kenyans.

L'exportation des éléments nutritifs provenant des cultures (EX1) et des résidus (EX2) a été quantifiée grâce à la combinaison d'une série de données primaires et d'estimations basées sur des données secondaires. Des échantillons de produits récoltés et de résidus de maïs, de banane d'abyssinie, de tef et de haricot ont été analysés au laboratoire de l'ILRI afin de connaître la teneur en azote et phosphore. Cette analyse était nécessaire compte tenu d'importantes variations des valeurs signalées dans les publications relatives à la composition d'azote et de phosphore du maïs, et du manque de données de N et P de la banane d'abyssinie, du tef et du haricot. Les compositions en N et P de la patate douce, du taro et du sorgho ont été estimées grâce aux données de la FAO. L'exportation des éléments nutritifs des résidus de récolte a été calculée en prenant en compte la portion de résidus retirée du champ et utilisée comme aliments pour animaux ou comme combustible. Dans les hautes-terres, environ 80 pour cent

des résidus de récolte ont été entièrement enlevés du champ, mais dans les basses-terres la proportion n'a été que de 30-50 pour cent. Les gammes de valeurs élevées et basses de composition en éléments nutritifs du maïs ont été déterminées par les valeurs moyennes des quartiles les plus élevées et les plus basses issues de 15 points de données provenant de plusieurs pays d'ASS.

Aucune information quantitative n'a été disponible concernant le lessivage et la dénitrification dans la zone étudiée ou dans d'autres ZAE comparables et se trouvant à proximité. Par conséquent, les pertes en azote par lessivage (EX3) ou dénitrification (EX4) ont été estimées grâce à la fonction de transfert de Smaling, Stoorvogel et Windmeijer (1993). Ces auteurs ont calculé des équations de régression multiple pour EX3 et EX4 en utilisant les paramètres, couramment acceptés, de précipitation, de texture du sol (teneur en argile), d'azote dans le sol et d'application d'engrais (IN1) et de matière organique (IN2). Les équations de régression multiple ont la forme suivante:

$$EX3 = 2,3 + (0,0021 + 0,0007 \times F) \times P + 0,3 \times (IN1 + IN2) - 0,1 \times PN$$

où:

F = classe de fertilité du sol, les sols des hautes-terres sont supposés modérés (2) les sols des basses-terres sont supposés faibles (1),

P = précipitation (moyenne annuelle, en millimètres),

PN = prélèvement total d'azote (en kilogrammes par hectare);

$$EX4 = X + 2,5 \times F + 0,3 \times (IN1 + IN2) - 0,1 \times PN$$

où X = «humidité relative». C'est une valeur spécifique de CET estimée à 5 kg N/ha/an pour les zones d'Afrique qui sont caractérisées par des précipitations incertaines comme la région de Kindo Koisha.

La volatilisation de l'ammoniacque et le brûlis peuvent également provoquer des pertes en azote. Cependant, la volatilisation est communément reconnue comme négligeable sur les sols acides très altérés d'Afrique de l'est. Par conséquent, ces deux processus n'ont pas été considérés pour cette étude. Dans la zone d'étude, les résidus de culture ne sont pas brûlés sur les champs mais sont utilisés en tant qu'aliment pour les animaux. Ceci est la raison pour laquelle les pertes en éléments nutritifs par le brûlis ont été considérées négligeables.

L'érosion des sols n'apparaît que dans les hautes-terres de Kindo Koisha. L'érosion a été estimée en utilisant une version simplifiée et adaptée de l'EUPT (Hurni, 1985). L'équation permet de prévoir la perte en terre en fonction de l'érosivité par l'eau de pluie, de l'érodibilité du sol, de la longueur et de l'inclinaison de la pente, de la couverture végétale et de la gestion des terres.

La perte en éléments nutritifs du sédiment érodé a été calculée grâce aux valeurs de N et P des sédiments érodés. Ces valeurs, déterminées par Belay (1992) pour la zone considérée, sont les suivantes: 0,22 pour cent d'azote total et 0,07 pour cent de phosphore total.

Les valeurs des bilans N et P sont considérées comme les plus vraisemblables car elles ont été calculées par des procédures utilisant les hypothèses les plus probables pour Kindo Koisha. Cependant, certains paramètres tels que la déposition atmosphérique (IN3), le lessivage (EX3), la dénitrification (EX4) et l'érosion (EX5) ont été estimés d'après des données secondaires, au sein desquelles existe une certaine variabilité. Afin d'intégrer quelques unes de ces incertitudes, des valeurs 'optimistes' et 'pessimistes' ont été calculées. La procédure utilisée pour calculer les valeurs optimistes et pessimistes s'est inspirée de celle de Van der Pol (1992). Le bilan optimiste a été calculé en combinant les estimations élevées des flux entrants avec les estimations faibles d'exportations d'éléments nutritifs. Inversement, les valeurs pessimistes ont été préparées en associant les valeurs élevées d'exportations avec les valeurs faibles d'intrants.

En raison du manque de données se rapportant aux autres cultures, les estimations élevées et basses des exportations d'azote et de phosphore provenant des produits

récoltés et des résidus de maïs ont été utilisées afin d'estimer les gammes de valeurs de EX1 et EX2. Les valeurs relatives aux dépôts atmosphériques et au lessivage ont été calculées par l'équation de régression en utilisant des gammes de valeurs élevées et basses de précipitations. Les valeurs du facteur d'érosivité par l'eau de pluie (P), caractéristique de la région, ont été utilisées pour calculer les gammes de valeurs optimistes et pessimistes relatives à l'érosion (EX5). La valeur optimiste a été obtenue en utilisant les valeurs de précipitations les plus basses, ce qui correspond à un facteur P de 441, alors que la valeur pessimiste a été calculée grâce aux valeurs élevées de précipitations correspondant à un facteur P de 890.

TABLEAU 22

Bilans en éléments nutritifs des exploitations agricoles selon les groupes d'agriculteurs

	Groupes d'agriculteurs	N	P
		(kg/ha)	
Hautes-terres	Riche	-47	11,7
	Moyen	-51	4,8
	Pauvre	-19	3,6
	Très pauvre	-6	1,1
Basses-terres	Riche	-49	30,5
	Moyen	-41	17,3
	Pauvre	-55	3,8
	Très pauvre	-20	-1,6

Résultats

Les bilans azotés se sont révélés négatifs pour tous les groupes d'agriculteurs, alors que les bilans phosphorés sont apparus comme positifs pour la plupart des exploitations agricoles (tableau 22). Les agriculteurs les plus pauvres ont obtenu des taux d'appauvrissement en azote les plus bas, ce qui peut sembler contradictoire. Cependant, ils peuvent compenser de faibles intrants en engrais minéraux par un enrichissement intense du sol et par des pratiques de conservation des éléments nutritifs, y compris: une utilisation rationnelle du fumier; une gestion et un recyclage systématique des résidus de culture; un ramassage des feuilles mortes et une conservation améliorée du sol. Les différences entre les exploitations agricoles ont été très importantes. Les champs de banane d'abyssinie, de taro et de darkoa (du domaine) ont reçu de grandes quantités d'intrants et ont par conséquent obtenu un bilan positif ou neutre, par contre le shoka (à l'extérieur des champs) a révélé des bilans très négatifs en raison de faibles intrants.

Analyse

La méthode de calcul est basée sur celle de Stoorvogel et Smaling (1990), et les flux entrants et sortants ont été mesurés. La valeur ajoutée de cette étude est le calcul par groupes d'agriculteurs et par composante d'exploitation agricole (jardin de banane d'abyssinie, racine de taro et champs de shoka). L'étude a ainsi permis de montrer la diversité et la complexité des systèmes agricoles de la région de Kindo Koisha en Ethiopie mais aussi les différents types de gestion.

Système d'utilisation des terres basé sur la banane dans le nord-ouest de la République-Unie de Tanzanie

Les agriculteurs de la région de Bukoba, au nord-ouest de la République-Unie de Tanzanie, sont confrontés à une diminution permanente de la productivité des cultures. Les flux d'éléments nutritifs au sein des systèmes d'utilisation des terres ne sont pas suffisamment documentés. Grâce aux données recueillies, l'étude a réussi à établir les bilans en éléments nutritifs pour les différentes ZAEs. Les objectifs de cette étude ont été les suivants: (i) calculer les flux d'éléments nutritifs dans les jardins potagers; (ii) évaluer la durabilité des systèmes d'utilisation des terres basés sur la banane dans différentes ZAEs; et (iii) identifier les possibilités et établir des stratégies permettant d'augmenter l'efficacité des éléments nutritifs (Baijukya et Steenhuijsen de Piter, 1998).

L'agroécosystème de la région de Bukoba est caractérisé par un mélange de jardins potagers basés sur la culture de la banane (kibunja); champs de petite dimension avec

des cultures annuelles (kikamba) et les prairies (rweya). L'étude a considéré les bilans en éléments nutritifs des systèmes d'utilisation des terres basés sur la banane dans le kibunja car ce SET est le principal producteur agricole.

Méthodologie

Les auteurs de l'étude ont adopté le modèle de précédentes publications et recherches (e.g. Janssen, 1993) et ont vérifié ou modifié leurs données. Les flux d'éléments nutritifs ont été quantifiés d'après le modèle proposé par Stoorvogel et Smaling (1990).

Les données relatives aux intrants (IN1 et IN2) et aux extrants (EX1 et EX2) provenant des cultures (achetées, consommées et vendues), et de l'utilisation d'herbes et de cendres produites par les ménages, ont été rassemblées dans trois villages situés dans trois ZAEs différentes. Ces villages étaient représentatifs de la région. De précédentes études avaient déjà permis de rassembler un certain nombre de données telles que la dimension des exploitations agricoles et la production de haricot et de café.

Quinze agriculteurs par village ont été sélectionnés pour rassembler les données, six étaient étroitement surveillés et les autres étaient inspectés régulièrement: les 'agriculteurs contrôlés'. Les propriétaires de bétail ont formé un groupe distinct des agriculteurs ne disposant pas de bétail. Les agriculteurs qui faisaient l'objet d'une étroite surveillance avaient à disposition des balances (pour peser les bananes et les plantes racines récoltées et les herbes utilisées) et des registres (pour indiquer les cultures et les herbes utilisées). Les 'agriculteurs contrôlés' étaient interrogés sur leur production de banane et sur leur consommation d'herbe, et des échantillons de banane et d'herbe ont été pesés pour vérification. Les exploitations agricoles les plus étroitement surveillées étaient inspectées à des intervalles de deux semaines allant d'août 1993 à octobre 1994.

Divers échantillons de banane (la pulpe, la peau et la tige), des racines, des tubercules et des herbes (paillis, natte et produits de fermentation) ont été recueillis dans différents villages. Les échantillons ont été séchés et analysés afin de connaître leur composition totale en N, P, K, Ca, Mg et soufre (S). Les données d'apports en éléments nutritifs relatifs à l'utilisation de fumier étaient disponibles grâce à de précédentes études menées dans la région. Les données locales de déposition humide n'étaient pas disponibles. Les données concernant les compositions moyennes en éléments nutritifs de quatre échantillons d'eaux pluviales ont été recueillies à la station de recherche afin d'être en mesure de prédire la déposition humide. Les apports en éléments nutritifs ont été liés à la concentration de l'eau de pluie et à la moyenne des précipitations annuelles des différentes zones. Les apports par la déposition sèche ont été considérés négligeables compte tenu de l'humidité de l'environnement.

Le haricot (*Phaseolus vulgaris*) est l'unique espèce légumineuse poussant dans le kibanja. La contribution des haricots aux apports d'azote par la fixation biologique de l'azote atmosphérique (IN4), a été estimée à 50 pour cent du prélèvement total par les plantes. La contribution au bilan azoté par la fixation non symbiotique d'azote a été estimée en utilisant les données de précipitations annuelles de chaque zone. Les apports en éléments nutritifs par le processus de sédimentation (IN5) n'ont pas été considérés pertinents pour les jardins potagers pérennes.

Les données relatives aux pertes en éléments nutritifs des jardins potagers par lessivage (EX3) ont été disponibles pour la zone de hautes précipitations de Bukoba (Van der Eijk, 1995). Les pertes ont été calculées sur la base des concentrations en éléments nutritifs dans les eaux d'infiltration. Les données relatives aux précipitations, aux jours et aux mois de pluie et à l'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été utilisées afin de calculer les eaux d'infiltration dans les différentes ZAEs. L'ETP pour la région de Bukoba a présenté des moyennes de 3,5 mm/jour, et les jours de pluie ont été 260, 220 et 180 pour les différentes zones étudiées. Concernant la zone de hautes

précipitations de Bukoba, les eaux d'infiltration étaient de 990 mm/an et l'indice de lessivage a été estimé à 1. Pour la zone de basses précipitations de Karagwe-Ankolean (précipitations annuelles de 900 mm/an), les eaux d'infiltration étaient de 270 mm/an et l'indice de lessivage de 0,27. En appliquant la même procédure, l'indice de lessivage, pour la zone de moyennes précipitations de Bukoba, a été estimé à 0,64. Les pertes en éléments nutritifs par lessivage pour la zone de fortes précipitations ont été extrapolées aux autres zones par le biais des indices de lessivage calculés. Les pertes en soufre ont été estimées sur la base des rapports de Ca:Mg:S de Van der Eijk (1995) et Umoti, Atage et Isnemila (1983).

La dénitrification a été considérée comme le processus le plus important par lequel les gaz s'échappent (EX4). Les pertes gazeuses par volatilisation n'ont pas été considérées importantes car il n'y a que très peu de sols alcalins à Bukoba. Le pourcentage d'azote minéralisé dans le sol a été calculé en déterminant la fraction de matière organique du sol qui se décompose annuellement (k) et le coefficient d'humification de la matière fraîche organique (h). Il a été indiqué (Janssen, 1984; Janssen, 1993) que k est fonction de la température et h de la nature de la matière organique fraîche. La température moyenne annuelle à Bukoba est de 21 °C et il a été estimé que la valeur k était de 5 pour cent. Les principales matières organiques fraîches appliquées sont les résidus de banane, l'herbe et le fumier. Les valeurs h associées à ces dernières sont respectivement: 0,2; 0,3; et 0,5. La relation entre la matière organique du sol (MOS), la matière organique réelle (MO), la matière organique fraîche (MOF), k et h est:

$$MO = k \times MOS = h \times MOF$$

Grâce aux informations indiquées ci-dessus, et en considérant que la densité apparente du sol soit de 1,25 g/cm³ et que le rapport entre le carbone et l'azote soit de 11, la minéralisation des sols des jardins potagers dans les différentes zones a ainsi pu être calculée.

La dénitrification du sol (DN exprimée en pourcentage d'azote minéralisé) a été calculée par le biais d'une fonction de transfert:

$$DN = -9,4 + 0,13 \times \text{teneur en argile} + 0,01 \times \text{précipitations annuelles}$$

Pour les sols dotés d'une minéralisation de l'azote de 330 kg/ha/an, d'un pourcentage en argile de 25 pour cent et d'un indice de pluviosité de 1 900 mm, la DN est de 13 pour cent. Par conséquent, la perte en azote est de 42 kg/ha/an.

Les exportations d'éléments nutritifs par l'érosion (EX5) n'ont pas été considérées significatives compte tenu de l'absence de traces d'érosion dans les champs des agriculteurs.

Les principaux flux d'éléments nutritifs dans les jardins potagers des différentes ZAEs ont été convertis en un modèle d'intrant-extrant (tableau 23). Les éléments nutritifs considérés pour les calculs de bilan ont été les suivants: N, P, K, Ca, Mg et S. A l'exception de P, qui est disponible en abondance, ces éléments nutritifs se sont avérés être des facteurs limitants pour la majorité des sols Bukoba. Les paramètres utilisés pour calculer les bilans étaient pour la plupart indépendants de l'échelle. Par conséquent, ils peuvent être utilisés pour calculer les bilans au niveau de la parcelle, de l'exploitation agricole et du village.

Résultats

Le tableau 24 indique que les bilans en éléments nutritifs étaient négatifs pour les jardins potagers où le bétail n'était pas présent, et positifs pour ceux disposant de bétail. Ces résultats suggèrent que l'augmentation du nombre de têtes de bétail soit une solution permettant de faire face au problème de diminution de la fertilité du sol. Cependant, les résultats sont, dans une certaine mesure, trompeurs. Le jardin potager ne représente qu'une composante du système agricole, et les prairies doivent produire la quantité d'alimentation nécessaire pour le bétail, causant lui-même l'épuisement du sol.

TABLEAU 23
Flux d'éléments nutritifs au niveau de l'exploitation agricole

Flux	Éléments nutritifs		
Intrant	IN1	Engrais minéraux	
	IN2	Apports de matière organique	
		IN2a	Herbe (paillis, natte et produit de fermentation)
		IN2b	Concentré pour les vaches laitières
		IN2c	Fourrages pour l'alimentation des vaches laitières
	IN2d	Fumier du bétail pâturant à l'extérieur des exploitations agricoles	
	IN3	Dépôts atmosphériques par la pluie	
	IN4	FBA par les haricots et bactéries libres du sol	
	IN5	Sédimentation ^a	
	IN6	Exploitation du sous sol par le café et par d'autres arbres pérennes ^b	
	Extrant	EX1	Cultures, banane, café, haricots, racines et tubercules
EX2		Résidus des cultures et fumier quittant l'exploitation agricole ^a	
EX3		Lessivage en dessous de la zone d'enracinement	
EX4		Pertes gazeuses	
EX5		Ruissellement et érosion ^a	
EX6		Matières fécales humaines dans les latrines à fosse ^b	

^a Non applicable au système de kibanja.

^b Non considéré dans l'étude en question.

TABLEAU 24
Bilans en éléments nutritifs des exploitations agricoles de banane

Zone	Niveau de gestion des éléments nutritifs de l'exploitation agricole*	N	P	K
		(kg/ha/an)		
Bukoba: précipitations élevées	1	-76,2	-4,9	-50,0
	2	-73,9	4,2	-41,2
	3	-7,5	10,8	-6,4
	4	7,0	12,3	15,5
	5	80,5	42,8	198,7
Bukoba: précipitations moyennes	1	-49,0	-1,7	-39,8
	2	-45,0	-1,0	-22,8
	3	-6,7	8,0	-4,8
	4	1,7	8,8	4,3
	5	30,8	23,5	90,9
K-A précipitations faibles	1	-27,9	-2,7	-30,1
	2	-25,1	-2,0	-20,6
	3	-8,7	1,6	-15,1
	4	-3,9	2,4	-8,8
	5	11,0	8,9	32,1

* Niveau de gestion des éléments nutritifs de l'exploitation agricole: 1 = exploitation agricole sans bétail et sans fermentation; 2 = exploitation agricole sans bétail mais avec des équipements de fermentation; 3 = exploitation agricole avec bétail local mais sans utilisation de litière; 4 = exploitation agricole avec bétail local et avec utilisation de litière; 5 = exploitation agricole avec bétail amélioré (stabulation permanente).

Analyse

Cette étude est un exemple de gestion de niche agroécologique, qui traite d'un système agricole basé sur la banane dans la République-Unie de Tanzanie. La méthode se base sur celle de Stoorvogel et Smaling (1990) et n'a été que très légèrement adaptée. Une différenciation entre les agriculteurs a été faite, portant dans ce cas de figure sur le nombre de têtes de bétail utilisé en combinaison avec le système de culture de la banane.

Types d'utilisation des terres dans l'est et le centre de l'Ouganda

L'objectif de cette étude a été d'estimer les bilans en éléments nutritifs au niveau de la culture, du TUT et de l'exploitation agricole, et d'évaluer l'impact de nouvelles technologies sur les bilans en éléments nutritifs et la productivité. Les bilans ont été estimés pour des systèmes agricoles à échelle réduite dans quatre zones situées à l'est et au centre de l'Ouganda et caractérisées par une altitude moyenne et des terres subhumides. Différentes sources ont permis d'estimer les flux d'éléments nutritifs: les entretiens avec les agriculteurs, les observations des systèmes agricoles, les analyses du sol et le résultat des modèles de simulation (Wortmann et Kaizzi, 1998).

Une enquête a été réalisée dans quatre régions de l'est et du centre de l'Ouganda au cours de la seconde saison de 1995 afin d'estimer les bilans en éléments nutritifs au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole. Les caractéristiques de chaque région sont différentes mais révèlent certaines ressemblances: deux campagnes agricoles principales avec une moyenne des précipitations de 1 050-1 300 mm, des moyennes de température similaires et des cultures similaires (bien que leur importance relative soit variable). L'utilisation des terres a été divisée en sept catégories: systèmes basés sur la banane, systèmes annuels de culture, jachère, pâturage, amas d'arbres, plantations d'herbe à éléphant et jardins potagers.

Méthodologie

De 9 à 10 agriculteurs ont été interrogés dans chaque zone d'étude et quand il s'est avéré possible, la validité de leurs réponses a été vérifiée. Des cartes de leurs exploitations agricoles ont été préparées afin d'indiquer la dimension et l'utilisation des différentes parcelles. Des observations détaillées effectuées sur trois parcelles ont inclus: l'inclinaison, la longueur de la pente, les propriétés physiques et chimiques du sol (texture, carbone organique, pH avec eau 1:1, P Olsen, CEC et la quantité totale de N, P et K) à une profondeur de 0-20 cm et pour la texture à une profondeur de 20-40 cm. Les agriculteurs ont été interrogés en détail sur l'utilisation des parcelles et les flux d'éléments nutritifs entrant et sortant des parcelles. Des observations ont été faites et des questions ont été posées sur les autres aspects des flux d'éléments nutritifs de la ferme, y compris sur la gestion et l'utilisation des déchets des ménages et du fumier, mais aussi sur la vente et l'achat des différentes denrées.

A propos des parcelles étudiées en détail, il a été demandé aux agriculteurs de donner des estimations moyennes du rendement des cultures. Leurs estimations ont couvert une large gamme de valeurs non réalistes et, d'une manière générale, ont été considérées comme peu fiables. C'est pourquoi, les estimations moyennes de rendement sont basées sur les statistiques nationales et sur les expériences des chercheurs de la zone d'étude. Les teneurs en éléments nutritifs d'autres échantillons ont été déterminées grâce à l'analyse du matériel recueilli dans le centre de l'Ouganda. Les autres valeurs utilisées ont été déterminées grâce à des sources d'origines différentes.

Les pertes en terre par érosion ont été estimées par l'EUPT. L'enrichissement en éléments nutritifs du ruissellement a été estimé à 1,5. Aucune tentative n'a été faite pour estimer la sédimentation bien que celle-ci soit significative dans les TUTs de jachère et de prairie. Les pertes par lessivage, volatilisation et dénitrification ont pu être estimées grâce au modèle CERES du maïs (Ritchie *et al.*, 1989) qui est doté de trois descriptions de profils de sol, de quatre saisons de précipitations caractéristiques et d'un semis le 1 mars et le 15 août. Le modèle CERES du maïs est capable de saisir les nuances des données météorologiques journalières et d'estimer leurs effets sur les flux azotés en fonction des caractéristiques du profil du sol et des conditions de gestion des cultures. Au cours des simulations, qui se sont étalées sur une période de cinq mois, les précipitations ont varié de 374 à 591 mm. Les estimations de pertes azotées ont été utilisées afin de calculer le bilan en azote de toutes les cultures. Le modèle d'évaluation quantitative de la fertilité des sols tropicaux (QUEFTS, Janssen *et al.*, 1990) a été utilisé

pour interpréter les données issues des essais. Le modèle QUEFTS permet de donner une estimation de la disponibilité des éléments nutritifs au cours d'une saison et de la productivité du sol en termes de rendement de maïs en utilisant les données suivantes: carbone organique, pH du sol dans l'eau, P Olsen, K échangeable, les quantités totales de N, P et K.

On a considéré que la quantité de cendres et de déchets secs ménagers par famille était de respectivement 20 et 100 kg/an. Pour le bétail de pâturage, il a été estimé que 50 pour cent des matières fécales et des urines étaient déposés dans les zones de pâturage, où la perte en N par volatilisation était de 10 pour cent. Les pertes en éléments nutritifs du fumier ont été estimées comme suit: pour le bétail gardé dans les enclos ouverts, 50 pour cent pour N et 20 pour cent pour P et K; et pour le bétail enfermé dans une structure couverte, 20 pour cent pour N, P et K. Le fumier brûlé représente une perte en N de 80 pour cent et en P et K de 20 pour cent; 25 pour cent du restant a été perdu en raison de l'érosion et du lessivage.

Les taux de consommation humaine annuelle de N, P et K ont été estimés à 4, 0,36 et 6 kg par personne. Bien que certains de ces éléments nutritifs soient recyclés par la croissance des plantes, aucune tentative visant à estimer ces quantités n'a été effectuée. Les éléments nutritifs consommés par les humains ont été considérés comme perdus par le système. A la suite du battage des cultures dans les foyers, le brûlage des haricots et des résidus de culture du soja est fréquent dans la région de Palissa. Les cendres sont couramment utilisées pour la cuisine. Le brûlage des résidus de culture a été estimé en une perte en N de 80 pour cent et de 20 pour cent pour P et K.

Résultats

Les exploitations agricoles de petite dimension situées dans le centre et l'est de l'Ouganda ont des caractéristiques diverses du point de vue biologique, agronomique et économique. Cependant, les bilans en éléments nutritifs se sont révélés négatifs dans toutes les zones d'étude et permettent de montrer que les systèmes en place ne sont pas durables même avec un niveau de productivité faible. Les bilans en éléments nutritifs dans le TUT basé sur la banane sont proches de zéro (tableau 25), en raison du transfert de matériel organique provenant d'autres TUTs. Les cultures annuelles ont eu d'importantes pertes en éléments nutritifs dues à l'exportation des produits récoltés et de l'érosion.

Analyse

Le bilan en éléments nutritifs est basé sur la méthode de Stoorvogel et Smaling (1990), mais certains flux ont été calculés d'une manière différente. Les pertes gazeuses et par lessivage ont été estimées grâce au modèle CERES du maïs, qui utilise les données locales relatives aux sols. Ceci a probablement permis de mieux estimer le bilan en éléments nutritifs, que ne l'auraient permis les fonctions de transfert, car les données se fondent sur les caractéristiques locales. L'étude en question a bien différencié les types d'apports en matière organique; le paillis ou l'application des résidus de culture, le fumier, les cendres et les déchets des ménages ruraux ont été considérés de façon séparée.

TABLEAU 25
Bilan en éléments nutritifs des principales cultures

Cultures	N	P	K
	(kg/ha/an)		
Banane	-13,2	1,2	-35,7
Maïs	-104,2	-13,6	-82,4
Haricot	-40,4	-8,8	-42,7
Patate douce	-71,3	-13,2	-78,9
Soja	-121,5	-16,4	-68,3
Jachère	33,2	-1,5	-13,7
Pâturage	19,2	-3,3	-30,7
Jardin potager	3,0	-1,8	-18,9

Une plantation de sisal dans la République-Unie de Tanzanie

Hartemink (2001) a développé plusieurs cas d'étude sur la diminution de la fertilité des sols dans les tropiques. L'étude souligne l'importance des données de base relatives aux modifications des

propriétés du sol par rapport au déclin de la fertilité du sol. Elle compare les résultats des bilans en éléments nutritifs avec les modifications du sol. Le cas d'étude sur les plantations de sisal se fonde sur un travail expérimental développé dans la région Tanga. Le sisal est une culture à fibre qui pousse majoritairement dans les grandes plantations (Hartemink et Van Kekem, 1994).

Méthodologie

Deux approches ont été utilisées afin de suivre les propriétés chimiques du sol. La première approche s'est intéressée aux dynamiques du sol qui ont été contrôlées au cours du temps pour le même site. Cette approche est intitulée échantillonnage chronoséquentiel ou encore données de Type I. Les données de Type I montrent les modifications des propriétés chimiques du sol au cours du temps pour un type d'utilisation des terres. Concernant la seconde approche, les sols de différents systèmes d'utilisation des terres contiguës ont été échantillonnés en même temps et comparés. Cette approche est intitulée bioséquentielle ou données de Type II. L'hypothèse sous-jacente est que les sols cultivés et non cultivés sont issus de séries de sols identiques, mais les différences dans les propriétés du sol peuvent être attribuées aux différences d'utilisation des terres.

Les propriétés du sol des champs cultivés ont été comparées avec les données chronologiques des années 50 à 60 provenant des mêmes champs (données de Type I). Des échantillons de la couche arable ont été prélevés dans les champs de sisal et dans des terres similaires situées juste à côté des plantations mais n'ayant jamais été cultivées (données de Type II).

Un bilan en éléments nutritifs a été calculé pour un champ de sisal cultivé de façon permanente depuis 1957. Les données relatives au sol et au rendement (Rhodic Haplustox) étaient disponibles de 1966 à 1990. Le bilan comprenait les apports en éléments nutritifs suivants: dépôts humides, fixation non symbiotique de l'azote et éléments nutritifs ajoutés avec les semences et plants. Les engrais minéraux et les intrants organiques n'ont pas été appliqués sur les champs de sisal et n'ont donc pas été pris en compte. Les dépôts humides (une partie d'IN3) et la fixation non symbiotique de l'azote (une partie d'IN4) ont été calculés d'après Stoorvogel et Smaling (1990). L'apport des semences et plants pour le sisal est nécessaire car au début d'un cycle, des milliers de petits plants de sisal (environ de 2 kg chacun) sont apportés au champ. La seule exportation d'éléments nutritifs pouvant être vraiment quantifiée a concerné la récolte. Les résidus de culture n'ont pas été retirés du champ. L'érosion a été négligeable, car le sisal est une culture pérenne avec une couverture herbacée.

Résultats

Les bilans se sont révélés négatifs pour tous les éléments nutritifs (tableau 26), tout particulièrement pour K et Ca. Le bilan négatif a d'ailleurs été confirmé par la diminution de tous les éléments nutritifs présents dans la couche arable (0-20cm). Pour la plupart des éléments nutritifs, le bilan était plus négatif que ne l'étaient les modifications réelles du sol, sauf pour N où les modifications du sol étaient bien plus négatives. La raison invoquée peut être l'omission de flux sortants importants, par exemple le lessivage et les pertes gazeuses. La prise en compte de ces flux devrait rendre le bilan azoté davantage négatif.

Analyse

Cette étude est une des rares études qui traitent des cultures de plantations. Les mesures visant à améliorer la fertilité du sol risquent d'avoir plus d'effets sur les plantations en raison de meilleures occasions d'investissement. Un autre aspect ressortant de cette étude est la comparaison entre les modifications mesurées du sol et les bilans en éléments nutritifs. L'étude permet de conclure que les données de base sont fondamentales pour

TABLEAU 26

Bilan en éléments nutritifs et teneur en éléments nutritifs du sol d'un champ de sisal, 1966-1990

	N	P	K	Ca	Mg
Apports par les précipitations (kg/ha)	115	19	75	213	105
Apports par FBA (kg/ha)	19	0	0	0	0
Apports par les semences et plants (kg/ha)	32	10	35	87	13
Exportation par les rendements (kg/ha)	491	100	1 067	1 400	605
Différence (kg/ha)	-326	-71	-957	-1 100	-487
Bilan en éléments nutritifs (kg/ha/an)	-13	-2,8	-38	-44	-19
Teneur en 1966 (kg/ha)	5 764	52	369	996	355
Teneur en 1990 (kg/ha)	3 144	8	82	271	97
Différence (kg/ha)	-2 620	-44	-287	-725	-258
Modifications du sol (kg/ha/an)	-104	-1,8	-11	-29	-10

Source: Hartemink, 2001.

valider les bilans en éléments nutritifs et améliorer la compréhension des processus. Elle souligne également l'importance des essais à long terme. Le bilan en éléments nutritifs est fondé sur la méthode de Stoorvogel et Smaling (1990), mais plusieurs flux n'ont pas été inclus en raison de problèmes de disponibilité des données (pertes gazeuses et par lessivage) et du manque de pertinence des données (engrais minéraux, apports en matière organique, érosion et sédimentation).

Gestion de la fertilité du sol dans le sud du Mali

Cette étude développée par Kanté (2001) est décrite dans «*Scaling soil nutrient studies*» (FAO, 2003) et dans le projet VARINUTS (SC-DLO *et al.*, 2000) en tant qu'étude représentative du niveau micro. Les études au niveau micro offrent une image de la variation au sein d'une unité du niveau méso. Des facteurs de gestion peuvent être inclus, et un suivi peut permettre de vérifier si des changements dans la gestion des éléments nutritifs ont un rapport sur les bilans en éléments nutritifs et sur les revenus des exploitations agricoles. Dans cette étude, les agriculteurs ont été classés selon trois classes de 'gestion de la fertilité des sols', plutôt qu'en agriculteur 'moyen'. L'étude s'est concentrée sur deux villages de la zone de culture de coton du sud du Mali (M'Peresso et Noyaradougou), qui sont respectivement caractérisés par des pressions foncières fortes et modérées.

Méthodologie

L'étude a utilisé l'approche participative de la méthodologie RPAA (expliqué précédemment). Les ménages ruraux ont été classifiés en groupes de gestion des éléments nutritifs (1 = bonne gestion, 3 = mauvaise gestion). La répartition en différents groupes était représentative de la taille des ménages ruraux, de la propriété d'animaux et de fumier, et de charrettes. La classification a été évaluée annuellement et les agriculteurs ont été promus ou relégués à d'autres classes.

Le bilan en éléments nutritifs est basé sur la méthode utilisée par Stoorvogel et Smaling (1990), mais a principalement utilisé des 'bilans partiels' afin de comparer les exploitations agricoles et les villages. Le bilan partiel comprenait IN1 (engrais minéraux), IN2 (apports en matière organique), EX1 (produits récoltés) et EX2 (résidus de culture). Ces flux sont ceux étant les plus liés au mode de gestion et sont également intitulés comme des flux d'éléments nutritifs 'faciles à mesurer'. Ces flux peuvent être quantifiés sur la base de données issues d'enquêtes de l'exploitation agricole mais peuvent aussi être exprimés en unités monétaires ou de travail. Les flux 'compliqués à mesurer' (IN3, IN4, IN5, EX3, EX4, EX5) ne sont généralement pas mesurés mais estimés par le biais de fonctions de transfert. IN2 a été subdivisé en deux catégories: compost et fumier animal, et EX2 a été subdivisé en exportation des résidus de culture par les animaux, exportation par les ménages, et le brûlis.

TABLEAU 27
Différences observées entre deux villages au Mali

	M'Peresso	Noyaradougou
Rapport jachère/terres cultivées	0,6	1,4
N total dans le sol (g/kg)	0,20	0,31
P total dans le sol (mg/kg)	126	171
Disponibilité de fumier organique (tonne)	26	11
Utilisation d'engrais minéraux pour le coton (kg/ha)	102	155
Résidus de culture utilisés comme aliment pour les animaux (%)	35	15
Résidus de culture utilisés comme compost (%)	16	43
Brûlage des résidus de culture (%)	3	16
Bilan partiel en N pour le coton (kg/ha)	58	22
Bilan partiel en N pour le maïs (kg/ha)	-30	2

Résultats

A priori, les deux villages sont dotés de systèmes de culture comparables. Le coton est la culture de rente essentielle et les céréales, telles que le maïs, le sorgho et le mil, sont les principales cultures alimentaires. Le bétail est également vital. Cependant, une observation plus approfondie montre que la pression foncière est considérablement plus élevée à M'Peresso (forte densité de population et rapport élevé entre les terres cultivées et la superficie totale des terres) et implique donc que la gestion des résidus de récolte soit plus intensive à M'Peresso (tableau 27). De manière similaire, il semble que Noyaradougou ait une pénurie de main d'œuvre, ce qui ne permet pas aux villageois de recycler l'ensemble des résidus de culture. L'application de fumier est plus importante à M'Peresso, alors que les agriculteurs de Noyaradougou utilisent davantage d'engrais minéraux afin de compenser ce déficit (tableau 28). Par conséquent, le bilan partiel en éléments nutritifs est davantage positif à Noyaradougou qu'à M'Peresso.

Analyse

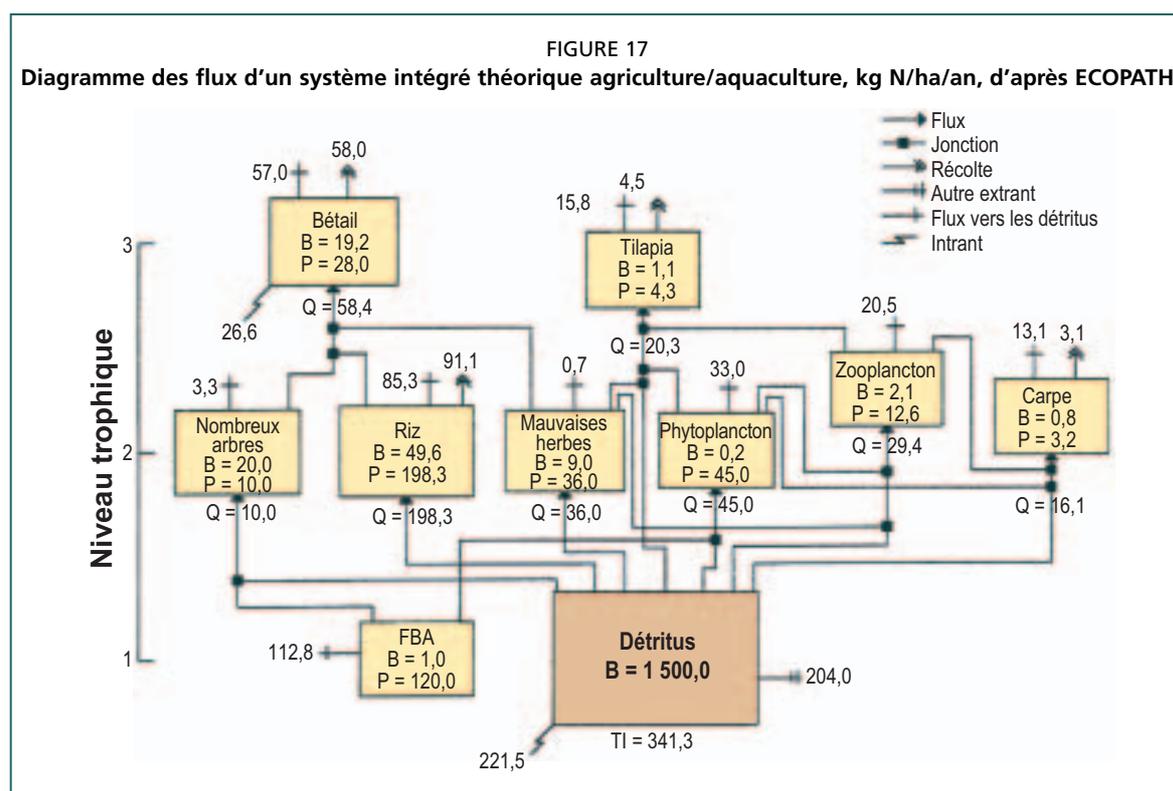
La présente étude est un bon exemple de la gestion intégrée des éléments nutritifs pour la zone cotonnière du Mali. L'approche participative et la répartition selon des classes d'agriculteurs ont rendu les résultats plus utiles, car un agriculteur 'moyen' n'existe pas. Le bilan partiel est profitable car il permet de comparer les différentes stratégies de gestion des éléments nutritifs. Cependant, afin d'en savoir davantage sur la durabilité du système, un bilan complet des éléments nutritifs serait nécessaire. En effet, un bilan partiel en éléments nutritifs ne permet pas d'exprimer les pertes indirectes en éléments nutritifs, comme par exemple le lessivage et les pertes gazeuses.

Intégration agriculture-aquaculture pour de petites exploitations en Asie

L'étude de Dalsgaard et Prein (1999) a utilisé une approche de modélisation des éléments nutritifs afin de montrer comment la combinaison des cultures, des arbres,

TABLE 28
Bilans partiels en éléments nutritifs de deux villages au Mali

	M'Peresso			Noyaradougou		
	N	P	K	N	P	K
	(kg/ha)					
IN1	15,3	4,0	4,3	41,9	8,3	10,4
IN2	16,8	3,3	22,7	10,8	2,0	14,6
EX1	18,7	2,2	4,7	25,2	3,3	6,3
EX2	14,1	1,2	36,7	16,7	1,1	21,1
Bilan partiel	-0,7	4,0	-14,4	10,7	6,0	-2,4



du bétail et des poissons, qui correspond à l'intégration agriculture-aquaculture (IAA), aide à optimiser les flux d'éléments nutritifs pour les agroécosystèmes asiatiques basés sur le riz. Les petites exploitations de IAA sont définies comme une agriculture polyvalente dans le sens où l'aquaculture (pisciculture) est développée en tant que sous-système d'une exploitation agricole avec d'autres sous-systèmes existants de cultures, d'arbres ou de bétail, ou en combinaison avec ces dernières. Une étude comparative sur le terrain à propos des systèmes intégrés et non intégrés de culture du riz a examiné les flux azotés de quatre agroécosystèmes philippins (Dalsgaard et Oficial, 1997).

TABLEAU 29

Valeurs publiées des flux azotés entrant et sortant des agroécosystèmes rizicoles fertilisés

Flux entrant	
Dépôts atmosphériques secs et humides	1,5 kg/ha/an
Ecoulement par l'eau d'irrigation	10 kg/ha/culture
FBA:	
Fixation dans la rhizosphère du riz	4 kg/ha/culture
Fixation hétérotrophe associée à la paille de riz	2-4 kg/tonne paille
Fixation hétérotrophe dans les sols cultivés inondés associés aux débris organiques	10-30 kg/ha/culture
Fixation photodépendante par les cyanobactéries	27 kg/ha/culture
Flux sortant	
Volatilisation de l'ammoniaque et dénitrification	50-75% d'azote fixé
Erosion et ruissellement	Inconnu
Lessivage	Inconnu

Source: d'après Dalsgaard et Prein, 1999.

Méthodologie

L'approche et le logiciel ECOPATH ont été utilisés pour la modélisation et l'analyse des agroécosystèmes (Lightfoot *et al.*, 1993). Le bilan offre un bon support permettant d'étudier les caractéristiques des flux et des ressources d'éléments nutritifs dans les agroécosystèmes rizicoles. ECOPATH représente schématiquement les composantes individuelles des exploitations agricoles sous forme de cases et donne les valeurs des paramètres de biomasse, de production et de consommation ainsi que les liens avec les autres composantes, y compris les détritiques qui représentent la base des ressources du sol (figure 17). Les valeurs des différents flux entrants et sortants ont été obtenues par le biais d'enquêtes sur les exploitations agricoles et la bibliographie (tableau 29).

TABEAU 30
Indicateurs de performance agroécologique pour quatre systèmes agricoles philippins de petites dimensions

	Apport d'engrais et système rizicole			
	Elevé; monoculture	Elevé; diversifié	Faible; diversifié & intégré	
	Exploitation agricole A	Exploitation agricole B	Exploitation agricole C	Exploitation agricole D
Excédent en N (kg/ha/an) ^a	190	152	58	62
Bilan en N (kg/ha/an)	-2	72	1	-9
Efficiéce de N ^b	0,19	0,17	0,40	0,38
Rendement de N (kg N/ha/an)	43	45	39	33
Marge bénéficiaire brute (US\$/ha/an)	250	750	625	600

^a = perdu du système agricole tout d'abord sous forme gazeuse puis dans une moindre mesure par l'érosion/ruissellement

^b = rapport entre l'azote exporté par la culture et l'azote total apporté au système

Source: Dalsgaard et Oficial, 1997.

Résultats

Les enquêtes ont montré que des systèmes économiquement attrayants, productifs et équilibrés peuvent être créés et maintenus grâce à une gestion intégrée des ressources naturelles (tableau 30 - exploitations agricoles C et D). Elles ont également montré que des doses élevées d'engrais minéraux ne sont pas nécessairement associées à un bilan positif en éléments nutritifs (exploitation agricole A), mais plutôt à d'importants flux et des pertes élevées dans l'environnement. Les systèmes polyvalents procurant de grandes quantités d'intrants (exploitation agricole B) sont les systèmes qui, pour le moment, ont apporté les marges bénéficiaires brutes les plus importantes.

Analyse

Cette étude montre que les bilans en éléments nutritifs peuvent être également établis pour d'autres systèmes agricoles, tels que les systèmes intégrés d'agriculture-aquaculture. La fixation de l'azote est cruciale pour ces systèmes de culture basés sur le riz. Cependant, les flux sortants provenant du lessivage/percolation profonde et de l'érosion/ruissellement sont presque inconnus dans de tels systèmes.

Chapitre 3

Analyse générale

Ce chapitre examine les principaux aspects des études de bilan en éléments nutritifs qui n'ont pas été traités dans le Chapitre 2. Ces aspects sont les suivants: les incertitudes des bilans; l'échantillonnage des études; la disponibilité des éléments nutritifs vis-à-vis des flux d'éléments nutritifs; l'utilisation des données géographiques; l'extrapolation et l'impact des bilans négatifs.

INCERTITUDES

L'exactitude et la précision nécessaires pour effectuer un bilan en éléments nutritifs dépendent des objectifs et des auteurs de l'étude. L'exactitude et la précision dépendent largement de la complexité de l'écosystème et de la compréhension du cycle et des processus de transformation des éléments nutritifs. Les biais et les erreurs peuvent être responsables de l'introduction de certaines incertitudes. Un biais est défini comme une déviation systématique et une erreur comme une variation aléatoire. Cinq sources possibles de biais existent: les biais liés aux personnes, les biais d'échantillonnage, les biais de mesure, les biais de manipulation de données (y compris les suppositions) et la falsification.

Les erreurs d'échantillonnage trouvent leur origine dans les variations spatiales et temporelles. Les sols, les cultures et les déchets animaux sont variables dans le temps et dans l'espace et exigent des stratégies d'échantillonnage bien conçues. Les erreurs de mesure sont dues aux variations introduites lors des déterminations du volume et de la composition de l'échantillon. L'erreur de mesure est de manière générale moins importante que l'erreur d'échantillonnage. Le tableau 31 donne un exemple des erreurs relatives des flux d'éléments nutritifs pour les bilans azotés et phosphorés pour des exploitations agricoles au Pays-Bas (Oenema et Heinen, 1999).

ÉCHANTILLONNAGE

Afin d'améliorer et de valider les bilans en éléments nutritifs avec des données de meilleure qualité, davantage d'essais sont nécessaires. Les propriétés du sol sont très variables d'où la nécessité d'utiliser de bonnes stratégies d'échantillonnage. Une nouvelle technique permettant d'estimer rapidement les propriétés du sol, développée au Centre international pour la recherche en agroforesterie (CIRAF), peut s'avérer utile à cet égard. Un plan a été élaboré afin d'utiliser les bibliothèques spectrales du sol pour estimer de manière rapide les propriétés du sol sur la base de la spectroscopie de réflectance diffuse. Une grande bibliothèque contenant plus de 1 000 échantillons catalogués de la couche arable provenant de l'Afrique de l'est et du sud a été utilisée afin de tester l'approche. Un spectromètre portable (0,35-2,5 µm) disposant d'une source de lumière artificielle balaye les sols séchés à l'air. Des indicateurs intégrés de qualité du sol, qui sont

TABEAU 31
Valeurs approximatives des erreurs relatives des bilans en N et P dans des exploitations agricoles au Pays-Bas

Intrant	Erreur (%)	Extrant	Erreur (%)
Engrais	1-3	Lait	2-8
Fumier	10-20	Viande	2-10
Semences et plants	5-20	Fumier	10-20
Dépôts atmosphériques	10-30	Cultures	5-10
Concentrés	5-10	Lessivage	50-200
Fourrages	5-10	Ruissellement	50-200
		Volatilisation	50-200
Total	5-15	Total	10-20

des fonctions directes de la productivité des cultures et du processus d'enrichissement/appauvrissement du sol (par exemple intrants organiques et érosion), peuvent être calculés en utilisant la spectroscopie de réflectance dans un domaine de longueur d'onde proche du visible et de l'infrarouge.

Les propriétés du sol suivantes peuvent être déterminées: teneur en argile, teneur en limon, teneur en sable, pH, carbone organique, Ca échangeable, Mg échangeable, K échangeable, CEC, phosphore extractible et potentiel de minéralisation de N. De tels indicateurs doivent être immédiatement mesurables afin de permettre un suivi des impacts réels sur la qualité des sols. Cette technique permet de donner des caractéristiques d'un grand nombre d'échantillons de sol (2 000 échantillons/semaine). Des observations géopositionnées de l'indice de qualité spectrale peuvent être également interpolées géographiquement pour de grandes zones (> 1 000 km²) en utilisant l'imagerie satellitaire (Shepherd et Walsh, 2002).

En plus d'une stratégie d'échantillonnage sensée, des mesures et des méthodologies d'échantillonnage corrects sont cruciaux. Des données de haute résolution sont nécessaires afin d'évaluer avec exactitude les changements induits par les stratégies de gestion intégrée des éléments nutritifs, changements qui sont le plus souvent estimés à 20 pour cent voire moins. Ceux-ci sont détectables dans la mesure où les analyses statistiques sont correctement conçues. Cependant, des erreurs systématiques apparaissent dans les méthodes d'échantillonnage du sol et les analyses de laboratoire génèrent des données qui se trouvent être supérieures ou inférieures à l'échantillon moyen. Lors de l'échantillonnage du sol, une des causes d'erreur les plus répandues est de préparer des échantillons à des profondeurs données et d'évaluer les changements dans ces mêmes échantillons. Même de très faibles changements de la densité apparente du sol, qui apparaissent fréquemment au cours de tests comme résultat de processus naturels ou de la gestion des éléments nutritifs, modifient la masse de l'échantillon de sol pour des profondeurs données. Quand le sol est compacté au cours d'un essai, une surestimation des éléments nutritifs apparaîtra, alors que si le sol est décompacté, il y aura une sous-estimation. Des erreurs se situant entre 10-15 pour cent ne sont pas rares. Des erreurs similaires peuvent être introduites lors des analyses de laboratoire. Quand ces erreurs sont combinées aux erreurs d'échantillonnage du sol, ceci entraîne des données trompeuses et des conclusions erronées. Le prélèvement de la masse du sol élimine les erreurs d'échantillonnage causées par les prélèvements en profondeur, mais cela nécessite des méthodes qui ne sont que peu fréquemment employées (Wendt, 2003).

ÉLÉMENTS NUTRITIFS DISPONIBLES

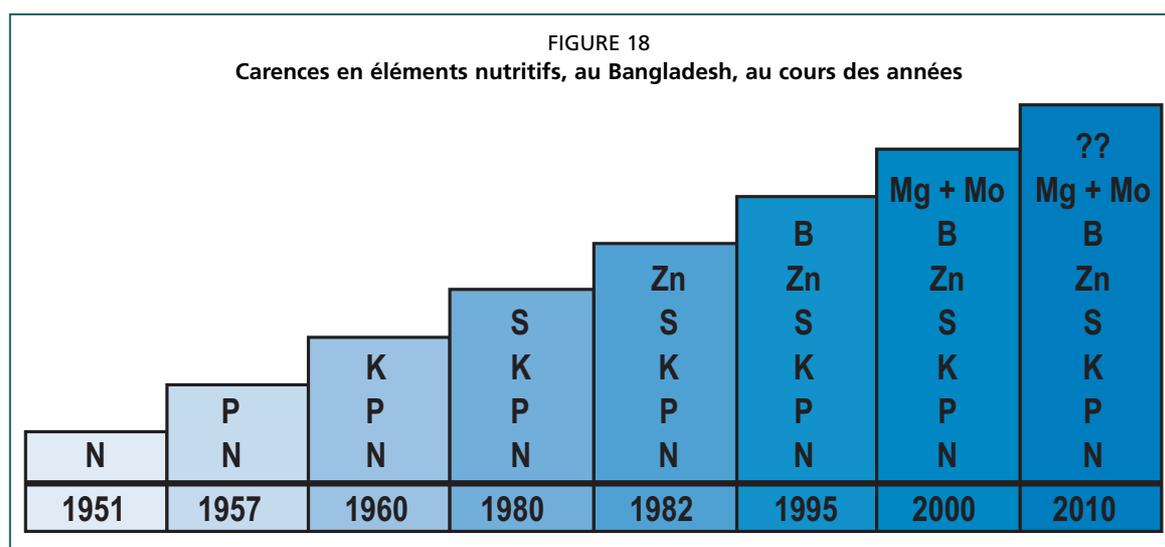
Les éléments nutritifs disponibles sont définis comme les éléments présents dans la solution du sol au début de la saison de croissance ou qui vont pénétrer dans la solution du sol au cours de la saison. En général, les flux EX1-EX4 se composent

uniquement de ces éléments. EX5 se compose des flux d'éléments nutritifs qui ne sont pas immédiatement disponibles, car ils sont bloqués dans la matière organique et les particules minérales (érosion) et les flux d'éléments nutritifs dissous donc disponibles (ruissellement). La situation est davantage complexe pour les flux entrants. La disponibilité des éléments nutritifs de IN1 et IN2 dépend de la composition des engrais et du fumier; elle est influencée par les conditions climatiques, la longueur de la saison de croissance et la vie dans le sol. IN3 est un flux composé des éléments nutritifs disponibles

TABLEAU 32
Estimation des éléments nutritifs disponibles pour chaque flux d'éléments nutritifs (en fractions)

	N	P	K
IN1	1,0	0,1	1,0
IN2	0,4	0,1	1,0
IN3	1,0	0,5	0,5
IN4	0,9	-	-
IN5	0,1	0,0	0,1
EX1	1,0	1,0	1,0
EX 2	1,0	1,0	1,0
EX 3	1,0	1,0	1,0
EX 4	1,0	-	-
EX 5	0,1	0,0	0,1

Source: Janssen, 1999.



Source: Rijpma et Fokhrul Islam, 2003.

directement à travers les précipitations et des éléments nutritifs disponibles de façon indirecte issus de la déposition sèche. Pour IN4 et IN5, les éléments nutritifs provenant de la fixation symbiotique de l'azote et de l'irrigation sont directement disponibles, alors que les éléments nutritifs issus de la fixation non symbiotique de l'azote et de la sédimentation ne sont pas disponibles. Le tableau 32 donne des estimations pour chaque flux.

La plupart des études de bilan en éléments nutritifs se concentrent sur les macroéléments N, P et K. Cependant, la croissance des cultures est fonction de l'élément nutritif le plus limitant, qui peut très bien être un des oligoéléments. Dans les pays consommant de grandes quantités d'engrais, la carence en éléments nutritifs évolue d'une insuffisance en macroéléments vers une insuffisance en oligoéléments car la plupart des engrais minéraux sont uniquement composés d'un mélange de N, P et K. Ceci est d'ailleurs illustré dans la figure 18 dans le cas du Bangladesh, par exemple une carence en bore (B) pour le blé, en Mg pour la pomme de terre ou le maïs et en zinc pour le riz.

DONNÉES GÉOGRAPHIQUES

La compréhension de la variation géographique de la réponse des cultures à la gestion et à l'environnement est une composante essentielle de la recherche agronomique. La disponibilité croissante des outils d'analyse géographique, tout particulièrement pour les SIGs, offre aux chercheurs des occasions d'améliorer les analyses. Les bénéfices associés sont: une meilleure sélection des sites de recherche ou des analyses; plus d'évaluations quantitatives de l'impact du climat et des facteurs édaphiques; et une meilleure appréciation et présentation des modalités de variations de réponses selon la région ciblée. D'une façon générale, la variation au niveau méso représenterait un intérêt pour les recherches dans une région où les échelles cartographiques sont de l'ordre de 1:10 000 à 1:500 000. L'échelle en question pourrait alors varier du niveau de la région ou du district au niveau du pays ou de la province (White, Corbett et Dobermann, 2002).

EXTRAPOLATION

Le point crucial lors de l'extrapolation est de déterminer les limites du système. Deux méthodes permettant d'extrapoler peuvent être utilisées: la généralisation et l'agrégation. Avec la généralisation, un individu représentatif caractérise un groupe ou

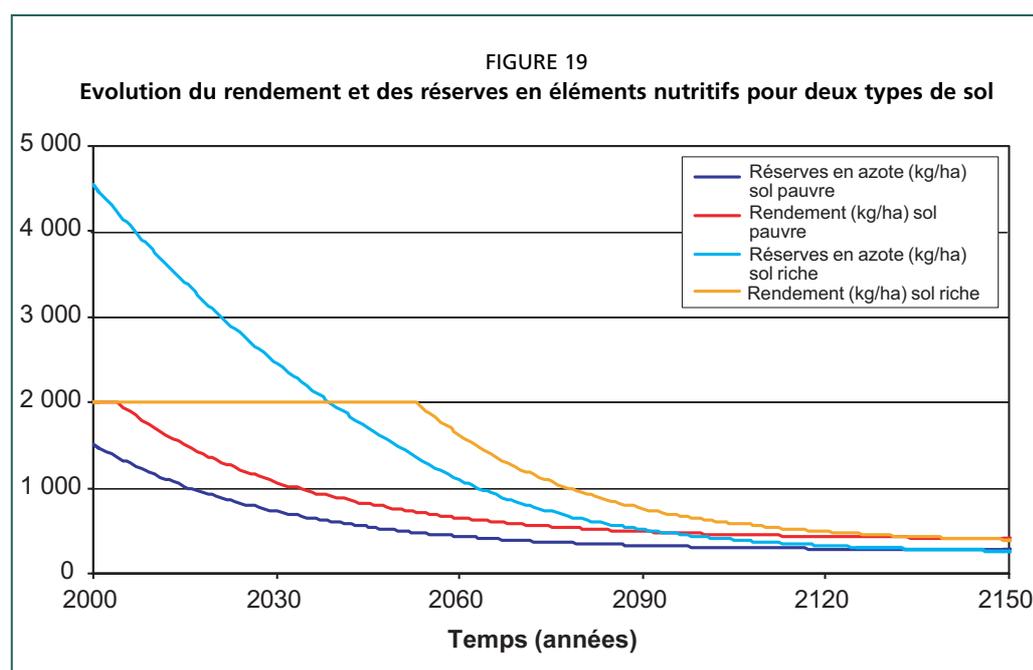
une population, par exemple les données d'application d'engrais par un agriculteur sont utilisées afin de décrire l'utilisation d'engrais pour l'ensemble du village. L'agrégation utilise les informations obtenues sur les individus afin de décrire une population. Ceci signifie qu'il faut regrouper les agriculteurs sur la base d'une ou de plusieurs propriétés communes. Les distributions statistiques peuvent être utilisées pour décrire la variabilité à l'échelle d'un groupe. L'échelle temporelle devrait également être prise en compte. A cet égard, la taille de la population est importante car les petits systèmes (par exemple les exploitations agricoles individuelles) évoluent plus rapidement et radicalement que les systèmes plus grands (par exemple le nombre de têtes de bétail au niveau national).

Le paradoxe est tel que l'extrapolation et la perte d'information sont très étroitement liées. Les informations relatives à l'échelle la plus petite facilitent la préparation des bilans en éléments nutritifs pour les échelles plus importantes. Cependant, une fois déterminé le bilan en éléments nutritifs de l'échelle la plus grande, l'information est perdue. Par conséquent, lorsque des bilans sont présentés, il est recommandé de fournir les informations relatives aux petites échelles mais utilisées pour préparer le bilan de l'échelle considérée. Les données quantitatives dotées d'une résolution spatiale et temporelle adéquates sur l'utilisation et la gestion des engrais, des déjections animales et des données environnementales sont généralement très rares (Van der Hoek et Bouwman, 1999).

IMPACT DE L'APPAUVRISSMENT DES SOLS EN ÉLÉMENTS NUTRITIFS

L'impact du bilan négatif en éléments nutritifs ne peut pas être envisagé de façon indépendante à la fertilité réelle des sols, par exemple les réserves en éléments nutritifs. Un bilan négatif d'un sol riche ne va pas influencer le rendement à court terme, alors que pour un sol pauvre, le rendement des cultures risque de diminuer chaque année en raison de l'appauvrissement en éléments nutritifs. A un certain point, dans des zones à faibles rendements, un bilan négatif risque de ne plus avoir d'effet sur la production car les rendements auront atteint un niveau tel que les apports issus de processus naturels comme les dépôts atmosphériques compenseront les pertes.

La figure 19 donne un exemple de l'évaluation de l'impact de l'appauvrissement en éléments nutritifs. Le maïs, cultivé sur un sol pauvre (réserves en N de 1 500 kg/ha) et



Source: FAO, 2003.

sans apports en engrais minéraux et organiques, atteint un rendement de 2 000 kg/ha. Le rendement commencera à diminuer une fois que la quantité d'éléments nutritifs disponibles (taux de minéralisation de 3 pour cent) deviendra inférieure aux besoins de prélèvement d'azote. Ceci apparaîtra dans un délai de cinq ans pour un sol pauvre, alors que l'appauvrissement en éléments nutritifs se poursuivra sans avoir d'incidence sur le rendement pendant 55 ans pour un sol plus riche. Dans ce cas de figure, l'équilibre à long terme sera atteint avec des rendements très bas (400 kg/ha) et des réserves en azote très faibles (270 kg/ha). Par conséquent, il est possible d'affirmer que l'appauvrissement en éléments nutritifs ne se manifeste pas de façon évidente, mais il est probable que les problèmes apparaissent pour les 'générations futures' comme souligné par la définition Brundtland (Brundtland, 1987).

Les diminutions de rendement et des réserves en éléments nutritifs peuvent également être exprimées en termes économiques. La diminution de rendement représente un coût privé (agriculteur), alors que la diminution des réserves en éléments nutritifs est un coût social. Les agriculteurs vont logiquement adapter leur gestion lorsqu'ils percevront une diminution de leur rendement. S'ils n'ont pas les moyens d'augmenter l'utilisation d'engrais ou de fumier, ils peuvent adapter leur gestion, par exemple en utilisant les engrais de façon plus rationnelle, par le biais de variétés à plus haut rendement et de la microvariabilité dans leurs champs et en appliquant d'autres techniques de gestion intégrée des éléments nutritifs.

Chapitre 4

Conclusions et mises en garde

Le tableau 33 donne un aperçu du bilan en éléments nutritifs pour chacune des études examinées dans les chapitres précédents. Les méthodologies de calcul de chaque bilan ont été effectuées en soustrayant la somme des intrants de la somme des extrants. La plupart des approches sont basées sur celle de Stoorvogel et Smaling (1990), avec cinq flux entrants et cinq flux sortants. Les bilans sont devenus géographiquement explicites au niveau macro, l'accent a été mis sur les systèmes agricoles au niveau méso, et les approches participatives et la gestion de la niche agroécologique ont été examinées au niveau micro.

NIVEAU MACRO

Au niveau macro, le modèle de bilan en éléments nutritifs permet de sensibiliser aux problèmes de fertilité du sol, d'indiquer les zones caractérisées par un appauvrissement ou une accumulation en éléments nutritifs, et d'offrir une description quantitative des

TABLEAU 33
Aperçu des études de bilan en éléments nutritifs

Echelle	Site	Particularité	N P K			Source	
			(kg/ha/an)				
Macro	Afrique subsaharienne		-22	-2,5	-15	Stoorvogel et Smaling (1990)	
	Afrique*					Henao et Baanante (1999)	
	Chine		-8	-4,5	-62	Sheldrick, Syers & Lingard (2003a)	
	Ghana	Explicite géographiquement	-27	-4	-21	FAO (2003)	
	Kenya	Explicite géographiquement	-38	0	-23	FAO (2003)	
Méso	Mali	Explicite géographiquement	-12	-3	-15	FAO (2003)	
	Région de Kisii, Kenya		-112	-3	-70	Smaling, Stoorvogel & Windmeijer (1993)	
	Sud du Mali	Scénario optimiste et pessimiste	-25	0	-20	Van der Pol (1992)	
	Andhra Pradesh, Inde		18	-12	-38	Singh <i>et al.</i> (2001)	
	Région de Nkawie, Ghana	Système basé sur le cacao	-18	-1,9	-20	FAO (2003)	
	Région de Wassa Amenfi, Ghana	Système basé sur le cacao	-4	-0,5	-11	FAO (2003)	
	Région d'Embu, Kenya	Système lait-café-thé	-96	-15	-33	FAO (2003)	
	Région de Koutiala, Mali	Système basé sur le coton	-12	1,4	-6,6	FAO (2003)	
	Micro	Sud du Mali	Approche participative	-8,2	8,5	7,4	Ramisch (1999)
		Sud de l'Ethiopie	Ménages ruraux socio-économiquement différents	-55 à -6	-1,6 à 30	-	Elias, Morse & Belshaw (1998)
Nord-ouest de la République-Unie de Tanzanie		Système basé sur la banane	-76 à 80	-5 à 43	-50 à 199	Baijukya et Steenhuijsen de Piters (1998)	
Ouganda de l'est et du centre			-125 à -3	-5 à -2	-11 à -9	Wortmann et Kaizzi (1998)	
République-Unie de Tanzanie		Plantation de sisal	-13	-2,8	-38	Hartemink (2001)	
Sud du Mali		Bilans partiels	-36 à -27	2,3 à 5,8	-32 à -11	Kanté (2001)	
Asie		Système agriculture-aquaculture	-9 à 72	-	-	Dalsgaard et Prein (1999)	

* Le bilan en éléments nutritifs a varié de -14 kg NPK/ha/an pour l'Afrique du Sud à -136 kg NPK/ha/an pour le Rwanda.

flux d'éléments nutritifs. Une évaluation au niveau macro peut offrir un point de départ à la sélection des zones exigeant une amélioration de la fertilité du sol. Une étude au niveau méso permet alors d'identifier les contraintes spécifiques et de dévoiler les meilleures options.

NIVEAU MÉSO

L'utilisation d'études au niveau méso ajoute de la valeur aux approches existantes au niveau du pays et de l'exploitation agricole. Les résultats au niveau méso donnent des informations qui ne peuvent pas être déduites du niveau macro ou micro. Le niveau méso offre un point de départ aux interventions des décideurs politiques et du secteur privé, alors que les niveaux macro et micro ne sont pas adéquats en matière de décision au niveau sous-national. D'amples améliorations méthodologiques sont réalisables si le niveau méso est rendu plus explicite géographiquement (en représentant la variation géographique des sols et du climat) et si les procédures de calcul des flux en éléments nutritifs sont améliorées et les réserves du sol quantifiées.

NIVEAU MICRO

De nombreuses études de fertilité du sol, effectuées au niveau micro, ont examiné différentes régions et systèmes agricoles par le biais d'approches et d'orientations diverses, telles que l'approche participative, les groupes socioéconomiques de ménages ruraux, les aspects économiques et des techniques de gestion intégrée des éléments nutritifs. Avec la méthode NUTMON, une approche standardisée pour contrôler les éléments nutritifs a été développée et permet d'établir des comparaisons entre les différentes études. Les études au niveau micro offrent un aperçu de la variation d'une unité de niveau méso. Les facteurs de gestion représentant un intérêt peuvent être inclus et un suivi permet de vérifier si les modifications dans la gestion des éléments nutritifs ont une influence sur le bilan en éléments nutritifs et le revenu de l'exploitation agricole. Une approche participative visant à élaborer et valider des instruments méthodologiques/logiciels spécifiques devrait être encouragée. Ceci nécessite de combiner des exemples de technologies de gestion de la fertilité du sol avec des mesures institutionnelles et socioéconomiques permettant d'améliorer le rythme d'adoption de ces technologies.

MISES EN GARDE

Validation

Le manque de validations et les incertitudes touchant aux différents flux d'éléments nutritifs représentent une des questions principales. Les études à grande échelle sont difficiles à valider compte tenu des dimensions des zones et de la quantité des données impliquées qui sont d'origine différente. La validation sur le terrain apparaît alors compliquée et coûteuse. Il est impossible de valider l'ensemble des flux d'éléments nutritifs au niveau macro car cet exercice nécessiterait un grand nombre d'échantillons. Il semblerait possible de valider chaque flux d'éléments nutritifs au niveau micro, mais ces validations devraient alors être extrapolées au niveau méso et macro. D'autres études à grande échelle comme dans le cadre du changement climatique et de la recherche sur la biodiversité sont caractérisées par des problèmes similaires de validation. Certains flux d'éléments nutritifs, tels que le lessivage, peuvent être validés par des expérimentations. Cependant, d'autres flux, tels que l'érosion ou l'application d'engrais minéraux, sont plus difficiles à valider. Comme il est quasiment impossible de valider l'ensemble du bilan en éléments nutritifs, on peut choisir de valider uniquement les flux considérés comme les plus importants. Par exemple, on peut mesurer l'érosion dans un champ si le bilan en éléments nutritifs indique que l'érosion est un des flux responsables des principales pertes. Ces observations et analyses sur le terrain devraient être réalisées sur la base d'une stratégie d'échantillonnage.

Lacunes

Bien que le bilan en éléments nutritifs comprenne les flux les plus importants, il ne prend pas en compte certains aspects. Au niveau macro, il n'intègre pas les processus à grande échelle tels que les incendies de forêts et le transport de sédiments des rivières aux bassins. Au niveau du bétail, il n'inclut pas spécifiquement l'urine bien que sa teneur en éléments nutritifs soit différente de celle des excréments. De plus, les pertes en éléments nutritifs de l'urine sont très élevées en raison du lessivage et de la volatilisation. Certains aspects, bien que n'étant pas directement liés au bilan en éléments nutritifs, peuvent se révéler importants pour le fonctionnement de l'ensemble de l'agroécosystème. Par exemple, la biodiversité souterraine a un impact direct sur la structure du sol et sur la libération des éléments nutritifs issus de la matière organique. Les effets à l'extérieur du site, tels que la sédimentation dans des réservoirs et un lessivage excessif des nitrates dans les eaux souterraines, peuvent aussi être connexes au bilan en éléments nutritifs. Selon la définition du système, les importations et exportations des produits entre pays peuvent représenter des flux importants, par exemple l'exportation de cultures de rente et l'importation d'engrais. Les dynamiques économiques, telles que le retrait des subventions ou les impacts de la libéralisation du commerce, créent un cadre essentiel qu'il faut connaître préalablement à la proposition de suggestions visant à améliorer la gestion des éléments nutritifs. Enfin, il est possible qu'il faille prêter attention aux éléments nutritifs autres que N, P et K, tels que Ca et S, ou aussi le carbone organique pour s'associer ainsi aux groupes de recherche sur la séquestration du carbone.

Utilité pour les décideurs politiques

Il est crucial que les décideurs politiques soient conscients des lacunes existantes dans le bilan en éléments nutritifs, de façon à ce qu'ils connaissent les limitations imposées par le modèle. Cet aspect soulève la question de savoir si les résultats actuels peuvent servir d'outils aux décideurs politiques ou si une recherche supplémentaire doit être engagée. Le modèle de bilan en éléments nutritifs s'est avéré être un indicateur utile pour les décideurs politiques informés, mais les résultats tels que présentés aujourd'hui n'offrent pas un point de départ aux interventions. Ce modèle permet de (i) sensibiliser aux problèmes de fertilité du sol, (ii) d'indiquer les zones caractérisées par un appauvrissement ou une accumulation en éléments nutritifs et (iii) d'offrir une description quantitative des flux d'éléments nutritifs au niveau macro. Au niveau méso, il est possible de: (i) identifier les contraintes spécifiques; (ii) utiliser les flux quantifiés d'éléments nutritifs dans le but de programmer certaines actions; et (iii) extrapoler les résultats à des régions similaires. De plus, les résultats sont susceptibles de convaincre les décideurs politiques à élaborer des plans d'actions visant à améliorer la fertilité du sol.

Présentation des résultats

Les résultats du modèle, exprimés en kilogrammes d'éléments nutritifs par hectare, ne sont pas très parlants pour les décideurs politiques. Ceux-ci préfèrent des résultats exprimés sous la forme de diminution de rendement ou de valeurs monétaires. Le bilan en éléments nutritifs devrait être relié à d'autres outils et données afin de le rendre davantage utile. Combiner un simple modèle de fertilité du sol/production de culture, tel que le QUEFTS (Janssen *et al.*, 1990), avec le bilan en éléments nutritifs permet d'exprimer l'appauvrissement en éléments nutritifs sous la forme d'une diminution du rendement. D'autres indicateurs peuvent être aussi associés aux flux et au bilan en éléments nutritifs tels que la valeur nutritive des aliments, les besoins en denrées alimentaires et en argent comptant, et les indicateurs d'équité. Les autres options consistent en l'utilisation de systèmes d'aide à la décision et d'études de scénarios. Afin de rendre le modèle de bilan en éléments nutritifs plus interactif, il est envisageable de le relier à un modèle comme celui permettant de convertir l'utilisation des terres et de ses

effets (CUTE) (Veldkamp et Fresco, 1996), et qui permet de simuler les modifications de l'utilisation des terres et de ses effets. Il est également possible de combiner les résultats avec d'autres données de SIG, comme les cartes de pauvreté ou de sécurité alimentaire.

Problèmes spécifiques de l'échelle choisie

Lors des calculs de bilan, chaque niveau d'échelle est caractérisé par un certain nombre de problèmes. Au niveau macro, les problèmes les plus importants sont les suivants: la qualité des données, l'interprétation cartographique, les différences de résolution et les analyses sur le terrain. Des vérifications sur le terrain, conformément à une stratégie d'échantillonnage, peuvent offrir une solution partielle. Les propriétés du sol et les réserves en éléments nutritifs pourront aussi être recueillies grâce à de nouvelles techniques et mener à une évaluation rapide par spectroscopie de réflectance (Shepherd et Walsh, 2002). Au niveau méso, les principaux problèmes sont: le manque de données géographiques, l'incorporation de systèmes de gestion différents et l'absence de facteurs socioéconomiques descriptifs, par exemple les facilités de crédit et le marketing. Les données géographiques seront de plus en plus disponibles dans le futur. Une image satellitaire classée et un MAD pourront améliorer de manière significative le bilan en éléments nutritifs au niveau méso. Au niveau micro, de nombreuses recherches ont déjà été effectuées. La méthode NUTMON est une application utile, qui inclut également l'aspect monétaire. Les questions à ce niveau sont les suivantes: comment affronter la diversité entre les exploitations agricoles mais aussi au sein de celles-ci; comment insérer la gestion intégrée des éléments nutritifs et la gestion intégrée de la fertilité des sols; et comment extrapoler ces résultats. Les options possibles sont: la stratification dans les méthodes d'échantillonnage, les techniques de gestion intégrée des éléments nutritifs dans les champs écoles d'agriculteurs et l'utilisation de SIG.

Bibliographie

- Baijukya, F.P. & Steenhuijsen de Piters, B. 1998. Nutrient balances and their consequences in the banana-based land use systems of Bukoba district, northwest Tanzania. *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 147-158.
- Batjes, N.H. 2002. *Soil parameter estimates for the soil types of the world for use in global and regional modelling (version 2.0)*. ISRIC Report 2002/02. Wageningen, The Netherlands, ISRIC.
- Belay, T. 1992. *Erosion: its effects on properties and productivity of eutric nitosols in Gununo Area (Kindo Koisha), southern Ethiopia, and some techniques of its control*. Bern, University of Bern.
- Brundtland, G.H. 1987. *Our common future*. World Commission on Environment and Development. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Dalsgaard, J.P.T. & Oficial, R.T. 1997. A quantitative approach for assessing the productive performance and ecological contributions of smallholder farms. *Ag. Sys.*, 55 (4):503-533.
- Dalsgaard, J.P.T. & Prein, M. 1999. Integrated smallholder agriculture-aquaculture in Asia: optimising trophic flows. In E.M.A. Smaling, O. Oenema & L.O. Fresco, eds. *Nutrient disequilibria in agroecosystems & concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Danso, S.K.A. 1992. Biological nitrogen fixation in tropical agroecosystems: twenty years of biological nitrogen fixation research in Africa. In K. Mulongoy, M. Gueye & D.S.C. Spencer, eds. *Biological nitrogen fixation and sustainability of tropical agriculture*. Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd.
- De Jager, A., Nandwa, S.M. & Okoth, P.F. 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). 1. Concepts and methodologies. *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 37-48.
- De Jager, A., Onduru, D., Van Wijk, M.S., Vlaming, J. & Gachini, G.N. 2001. Assessing sustainability of low-external-input farm management systems with the nutrient monitoring approach: a case study in Kenya. *Ag. Sys.*, 69: 99-118.
- De Willigen, P. 2000. *An analysis of the calculation of leaching and denitrification losses as practised in the NUTMON approach*. Report 18. Wageningen, The Netherlands, Plant Research International.
- Defoer, T. 2000. *Moving methodologies, learning about integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)
- Defoer, T. 2002. Learning about methodology development for integrated soil fertility management. *Ag. Sys.*, 73: 57-81.
- Döll, P. & Siebert, S. 2000. A digital global map of irrigated areas. *ICID Journal*, 49(2), 55-66.
- Elias, E., Morse, S. & Belshaw, D.G.R. 1998. Nitrogen and phosphorus balances of Kindo Koisha farms in Southern Ethiopia. *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 93-113.
- FAO. 1976. *A framework for land evaluation*. Soils Bulletin No. 32. Rome.
- FAO. 1984. *Erosion and soil productivity: a review*, by M. Stocking. Consultants' Working Paper No. 1. AGLS. Rome.
- FAO. 1986. *The cost of soil erosion in Zimbabwe in terms of the loss of three major nutrient*, by M. Stocking. Consultants' Working Paper No. 3. AGLS. Rome.
- FAO. 1994. *Fertilizer use by crop*. Rome.
- FAO. 1996. *Production yearbook 1995, Vol. 49*. Rome.

- FAO. 1998. *Crop evapotranspiration & guidelines for computing crop water requirements*, by R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes & M. Smith. FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome.
- FAO. 2000. *Livestock distribution, production and diseases: towards a global livestock atlas* by W. Wint, J. Slingenbergh & D. Rogers. Consultants' report. Rome.
- FAO. 2001. *Global farming systems study: challenges and priorities to 2030. Synthesis and global overview*, by J. Dixon, A. Gulliver & D. Gibbon. Rome.
- FAO. September 2002 & July 2003. *Electronic conference on assessment of soil nutrient depletion and requirements & approach and methodology*. Rome.
- FAO. 2003. *Scaling soil nutrient balances*, J.P. Lesschen, R.D. Asiamah, P. Gicheru, S. Kanté, J.J. Stoorvogel & Smaling, E.M.A. Rome.
- FAO/UNESCO. 1997. *Digital soil map of the world and derived soil properties*. Land and Water Digital Media Series No 1. Rome.
- FAO & IIASA. 2000. *Global agro-ecological zones*. Land and Water Digital Media Series No 11. Rome.
- Frissel, M.J. 1978. *Cycling of mineral nutrients in agricultural ecosystems*. London, Elsevier.
- Giller, K.E. 2001. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems*. 2nd edition. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Giller, K.E. & Wilson, K.J. 1991. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems*. Wallingford, UK, CAB International.
- Gupta, A.K. 2001. Nutrient mining in different agro-climatic zones of India - Rajasthan. *Fert. News*, 46(9): 39&46.
- Hartemink, A.E. 2001. *Soil fertility in the tropics with case studies on plantation crops*. Reading, UK, The University of Reading. (Ph.D. thesis)
- Hartemink, A.E. & Van Kekem, A.J. 1994. Nutrient depletion in Ferralsols under hybrid sisal cultivation in Tanzania. *Soil Use Man.*, 10: 103&107.
- Henao, J. & Baanante, C. 1999. *Estimating rates of nutrient depletion in soils of agriculture lands in Africa*. Muscle Shoals, US, International Fertilizer Development Center.
- Hurni, H. 1985. *Soil conservation manual for Ethiopia*. Addis Ababa, Ministry of Agriculture.
- IFA/FAO. 2001. *Global estimates of gaseous emissions of NH₃, NO and N₂O from agricultural land*. Rome.
- IFA/IFDC/FAO. 2000. *Fertilizer use by crop*. 4th edition. Rome.
- Janssen, B.H. 1984. A simple method of calculating decomposition and accumulation of 'young' soil organic matter. *Plant & Soil*, 76: 296&304.
- Janssen, B.H. 1993. *Report on consultancy mission to the Lake zone Farming Systems Research Project on behalf of the Bukoba nutrient balance study*. Wageningen, the Netherlands, Wageningen Agricultural University.
- Janssen, B.H. 1999. Basics of budgets, buffers and balances of nutrients in relation to sustainability of agroecosystems. In E.M.A. Smaling, O. Oenema & L.O. Fresco, eds. *Nutrient disequilibria in agroecosystems & concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Janssen, B.H., Guiking, F.C.T., Van der Eijk, D., Smaling, E.M.A., Wolf, J. & Van Reuler, H. 1990. A system for Quantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils (QUEFTS). *Geoderma*, 46: 299&318.
- Kanté, S. 2001. *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)
- Khisa, P., Gachene, C.K.K., Karanja, N.K. & Mureithi, J.G. 2002. The effect of post-harvest crop cover on soil erosion in a maize-legume based cropping system in Gatanga, Kenya. *J. Ag. Trop. Subtrop.*, 103(1): 17&28.
- Lal, R. 1985. Soil erosion and its relation to productivity in tropical soils, In S.A. El-Swaify, W.C. Moldenhauer & A. Lo, eds. *Soil erosion and conservation*. Ankeny, US, Soil Conservation Society of America.

- Landon, J.R. 1991. *Booker tropical soil manual. A handbook for soil survey and agricultural land evaluation in the tropics and subtropics*. Essex, UK, Longman Group UN Ltd.
- Leemans, R. & Cramer, W. 1991. *The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness on a global terrestrial grid*. Research Report RR-91D18. November 1991. Laxenburg, Austria, International Institute of Applied Systems Analysis.
- Lightfoot, C., Bimbao, M.A.P., Dalsgaard, J.P.T. & Pullin, R.S.V. 1993. Aquaculture and sustainability through integrated resources management. *Out. Ag.*, 22(3): 143D15.
- Nyanteng, V.K. 1986. *Riceland in West Africa: distribution, growth and limiting factors*. Occasional Paper 7. Monrovia, WARDA.
- OECD. 2001a. *OECD national soil surface nitrogen balances D explanatory notes*. Paris, OECD Secretariat.
- OECD. 2001b. *Environmental indicators for agriculture D Volume 3: Methods and results*. Paris.
- Oenema, O. & Heinen, M. 1999. Uncertainties in nutrient budgets due to biases and errors. In E.M.A. Smaling, O. Oenema & L.O. Fresco, eds. *Nutrient disequilibria in agroecosystems D concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Pieri, C. 1983. Nutrient balances in rainfed farming systems in arid and semi-arid regions. In *Nutrient balances and the need for fertilizers in semi-arid and arid regions*, Proc. 17th Colloquium International Potash Institute. Rabat, International Potash Institute.
- Pieri, C. 1985. Bilans minéraux des systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. *L'Agron. Trop.*, 40: 1D20.
- Pieri, C. 1989. *Fertilité des terres de savanes. bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Paris, Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT.
- Ramisch, J. 1999. *In the balance? Evaluating soil nutrient budgets for an agro-pastoral village of southern Mali*. Managing Africa's Soils No. 9. London, IIED Drylands Programme.
- Rijpma, J. & Fokhrul Islam, M. 2003. *Nutrient mining and its effect on crop production and environment in Bangladesh*. Paper presented at seminar on "Soil Health Management"; DAE - SFFP Experience, Bangladesh.
- Ritchie, J.T., Singh, U., Godwin, D.C. & Hunt, L.A. 1989. *A user's guide to CERES-Maize V2.10*. Alabama, US, IFDC.
- SC-DLO, CIRAD-CA, INERA, NAGREF & KARI. 2000. *VARINUTS Spatial and temporal variation of soil nutrient stocks and management in sub-Saharan African farming systems*. Final report. Wageningen, The Netherlands, SC-DLO.
- Schoorl, J.M., Sonneveld, M.P.W. & Veldkamp, A. 2000. Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth Surf. Proc. Land.*, 25: 1025D1034.
- Schoorl, J.M., Veldkamp, A. & Bouma, J. 2002. Modelling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. *Soil Sci. Soc. Am.*, 66: 1610D1619.
- Scoones, I. & Toulmin, C. 1998. Soil nutrient balances: what use for policy? *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 255D267.
- Scoones, I. & Toulmin, C. 1999. *Policies for soil fertility management in Africa*. Nottingham, UK, IIED and IDS.
- Sheldrick, W.F., Syers, J.K. & Lingard, J. 2002. A conceptual model for conducting nutrient audits at national, regional, and global scales. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 62: 61D72.
- Sheldrick, W.F., Syers, J.K. & Lingard, J. 2003a. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships. *Ag., Ecosys. Env.*, 94: 341D354.
- Sheldrick, W.F., Syers, J.K. & Lingard, J. 2003b. Contribution of livestock excreta to nutrient balances. *Nut. Cyc. Agroecosys.*, 66: 119D131.
- Shepherd, K.D. & Walsh, M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am.*, 66(3): 988D998.

- Singh, H.P., Sharma, K.L., Ramesh, V. & Mandal, U.K. 2001. Nutrient mining in different agroclimatic zones of India Ð Andhra Pradesh. *Fert. News*, 46(8): 29Ð42.
- Smaling, E.M.A. 1993. *An agro-ecological framework for integrated nutrient management with special reference to Kenya*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Agricultural University. (Ph.D. thesis)
- Smaling, E.M.A., ed. 1998. Nutrient balances as indicators of productivity and sustainability in Sub-Saharan African agriculture. Special issue. *Ag., Ecosys. Env.*, 71.
- Smaling, E.M.A. & Fresco, L.O. 1993. A decision support model for monitoring nutrient balances under agricultural land use (NUTMON). *Geoderma*, 60: 235Ð256.
- Smaling, E.M.A., Oenema, O. & Fresco, L.O., eds. 1999. *Nutrient disequilibria in agroecosystems Ð concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J., & Windmeijer, P.N. 1993. Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales: II. District scale. *Fert. Res.*, 35: 237Ð250.
- Stoorvogel, J.J. & Smaling, E.M.A. 1990. *Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983Ð2000*. Report 28. Wageningen, The Netherlands, Winand Staring Centre.
- Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A. & Janssen, B.H. 1993. Calculating soil nutrient balances at different scales: I. Supra-national scale. *Fert. Res.*, 35: 227Ð235.
- Umoti, U., Atage, D.O. & Isnemila, A.E. 1983. Leaching losses of nutrients in oil palm plantations determined by tension lysimeters. *Plant & Soil*, 73: 365Ð376.
- US Geological Survey (USGS). 1998. *Hydro 1K Africa. Elevation data*. Sioux Falls, USA.
- US Geological Survey (USGS), University of Nebraska-Lincoln & European Commission's Joint Research Centre. 2000. *Africa land cover characteristics data base. Version 2.0. Seasonal land cover region legend*. Sioux Falls, USA.
- Van den Bosch, H., Gitari, J.N., Ogaro, V.N., Maobe, S. & Vlaming, J. 1998. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). 3. Monitoring nutrient flows and balances in three districts in Kenya. *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 63Ð80.
- Van der Eijk, J.C. 1995. *Nutrient losses via leaching in Bukoba District, Tanzania*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Agricultural University. (M.Sc. thesis)
- Van der Hoek, K.W. & Bouwman, A.F. 1999. Upscaling of nutrient budgets from agroecological niche to global scale. In E.M.A. Smaling, O. Oenema & L.O. Fresco, eds. *Nutrient disequilibria in agroecosystems Ð concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Van der Pol, F. 1992. *Soil mining: an unseen contributor to farm income in Southern Mali*. Bull. 35. Amsterdam, The Netherlands, The Royal Tropical Institute.
- Van der Pol, F. & Traore, B. 1993. Soil nutrient depletion by agricultural production in southern Mali. *Fert. Res.*, 36: 79Ð90.
- Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N. & Merckx, R., eds. 2002. *Integrated plant nutrient management in sub-Saharan Africa: from concept to practice*. Wallingford, UK, CABI Publishing.
- Veldkamp, A. & Fresco, L.O. 1996. CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecol. Mod.*, 85: 253Ð270.
- Vlaming, J., Gitari, J.N. & Van Wijk, M.S. 1997. Farmers and researchers on their way to integrated nutrient management. *ILEIA News.*, 13(3).
- Vlaming, J., Van den Bosch, H., Van Wijk, M.S., De Jager, A., Bannink, A. & Van Keulen, H. 2001. *Monitoring nutrient flows and economic performance in tropical farming systems (NUTMON) Ð Part 1: Manual for the NUTMON-Toolbox*. Wageningen, The Netherlands, Alterra.
- Wendt, J. 2003. *Assessing systems sustainability through high-precision evaluation for soil nutrient capital*. Paper presented at "Scaling soil nutrient balances" workshop, Nairobi, February 2003.

- White, J.W., Corbett, J.D. & Dobermann, A.** 2002. Insufficient geographic characterization and analysis in the planning, execution and dissemination of agronomic research? *Field Crop. Res.*, 76: 45Ð54.
- Wischmeier, W.H. & Smith, D.D.** 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agricultural Handbook No. 282. US, USDA.
- Wortmann, C.S. & Kaizzi, C.K.** 1998. Nutrient balances and expected effects of alternative practices in farming systems of Uganda. *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 115Ð129.

CAHIERS TECHNIQUES DE LA FAO

BULLETINS FAO: ENGRAIS ET NUTRITION VÉGÉTALE

1. Projets de distribution d'engrais à crédit, destinés aux petits agriculteurs, 1980 (A** F*)
2. Niveaux de production des récoltes et emploi des engrais, 1982 (A* E* F*)
3. Optimisation de l'efficacité des engrais sur les céréales, 1981 (A* E* F*)
4. Les achats d'engrais, 1982 (A* F*)
5. Emploi des engrais dans les systèmes de cultures multiples, 1986 (A* C***F*)
6. Maximizing fertilizer use efficiency, 1983 (A*)
7. Les oligo-éléments 1986 (A* C*** E* F*)
8. Manuel de distribution des engrais, 1990 (A* F*)
9. Guide es engrais et de la nutrition des plantes, 1986 (A* Ar* C*** E* F*)
10. Emploi rationnel des engrais sur les sols acides en zones tropicales humides, 1989 (A* F*)
11. Utilisation efficace des engrais dans les zones à cultures pluviales estivales, 1988 (A* F*)
12. Integrated plant nutrition systems, 1995 (A F)
13. Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable, 2003 (A, F)
14. Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol – Approches et méthodologies, 2005 (A, F)

Disponibilité: mai 2005

<i>A</i>	–	<i>Anglais</i>		<i>Multil</i>	–	<i>Multilingue</i>
<i>Ar</i>	–	<i>Arabe</i>		*		<i>Epuisé</i>
<i>C</i>	–	<i>Chinois</i>		**		<i>En préparation</i>
<i>E</i>	–	<i>Espagnol</i>				
<i>F</i>	–	<i>Français</i>				
<i>P</i>	–	<i>Portugais</i>				

On peut se procurer les Cahiers techniques de la FAO auprès des points de vente des publications de la FAO, ou en s'adressant directement au Groupe des ventes et de la commercialisation, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie.

Evaluation du bilan en éléments nutritifs du sol

Approches et méthodologies

Les évaluations des bilans en éléments nutritifs aident à déterminer les effets des pratiques agricoles sur la fertilité des sols. Selon les situations, plusieurs approches et méthodes ont été utilisées. Ce bulletin présente un aperçu de la situation actuelle des études des bilans en éléments nutritifs. Il fait apparaître l'évolution des différentes approches et méthodes, les compare et souligne les améliorations effectuées ainsi que les questions qui restent à résoudre. Cette analyse permettra le développement des méthodologies d'évaluation considérées comme des outils fiables visant à concevoir des interventions dans le domaine de la gestion de la fertilité des sols.

