BULLETIN FAO
ENGRAIS
ET NUTRITION
VÉGÉTALE

15

ISSN 0259-6180

Bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles

Application des méthodes intermédiaires aux réalités africaines

15

Bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles — Application des méthodes intermédiaires aux réalités africaines

FAO

Bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles

Application des méthodes intermédiaires aux réalités africaines

BULLETIN FAO
ENGRAIS
ET NUTRITION
VÉGÉTALE

15

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome, 2005

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 92-5-205237-2

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

Avant Propos ix
Remerciements x
Préface xi
Acronymes xii
Glossaire xiii

1. Introduction 1
Contexte de l'étude 1
Le modèle de bilan des éléments nutritifs 3
Objectif 4
Structure 4

2. Description de la zone d'étude 5
Choix du pays et de la région d'étude 5
Ghana 6
Système de culture à base de cacao 7
Importance économique 8
Kenya 9
Le système de production théier – caféier - laiterie 10
Mali 13
Le système de production basé sur le coton 13

3. Méthodes 17
Niveau global 17
Carte d'utilisation de la terre 17
Paramètres du modèle 20
Jachère 35
Niveau intermédiaire 35
Procédure générale 35
Ghana 37
Kenya 39
Mali 40
Niveau détaillé 42
Vue d'ensemble 43
Calcul des stocks d'éléments nutritifs du sol 44

4. Résultats **47**

Niveau global 47

Ghana 47

Kenya 49

Mali 51

Niveau intermédiaire 52

Système de production à base de cacaoyer au Ghana 52

Système de production à base de théier-caféier-laiterie au Kenya 53

Système de production à base de cotonnier au Mali 54

Niveau détaillé 56

Exploitations agricoles du District d'Embu, Kenya 56

Villages au Mali-Sud, Mali 58

5. Discussion **61**

Une comparaison des méthodologies au niveau global: 1990 et 2003 61

Comparaison entre niveau global et intermédiaire et entre niveau intermédiaire et détaillé 62

Comparaison du niveau intermédiaire entre les pays 64

Problèmes de données 65

Niveau global 65

Niveau intermédiaire 66

Niveau détaillé 67

Problèmes de modélisation 67

Carte d'utilisation de la terre 67

Modélisation de l'érosion 68

Calculs des bilans d'éléments nutritifs 69

Insuffisances et restrictions 70

Validation 70

Lacunes 71

Problèmes spécifiques pour chaque niveau d'échelle 71

Présentation des résultats 72

Utilité pour les décideurs politiques 72

Impact 73

Bibliographie **77**

Annexes

1. Teneurs en éléments nutritifs des fumiers 89
2. Valeurs de référence pour le modèle de régression de la lixiviation de K 91
3. Profondeur d'enracinement 93
4. Valeurs de référence pour les pertes gazeuses 95

5. Procédure pour la modélisation LAPSUS 101
6. Caractéristiques du sol - Classification FAO74 103
7. Données utilisées pour le bilan des éléments nutritifs au niveau général dans une étude FAO au Ghana, Kenya et Mali 105
8. Résultats des calculs du bilan des éléments nutritifs au niveau général d'une étude FAO au Ghana, Kenya et Mali 109
9. Données utilisées pour le bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire d'une étude FAO de 2003 au Ghana, Kenya et Mali 115
10. Résultats des calculs de bilan d'éléments nutritifs au niveau intermédiaire d'une étude FAO de 2003 au Ghana, Kenya et Mali 119
11. Résumés des présentations de l'atelier de 2003 à Nairobi sur les bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles 133

Liste des figures

1. Flux d'éléments nutritifs et flux économiques influençant le bilan des éléments nutritifs et le budget de l'exploitation 3
2. Carte des sols du district de Nkawie 7
3. Carte des sols du district de Wassa Amenfi 7
4. Zones agroécologiques du district d'Embu 10
5. Représentation quantitative des flux d'azote (kg/tête/an) dans un système sans pâturage au Kenya 12
6. Carte morphologique du cercle de Koutiala 14
7. Système cotonnier: partie industrielle, du marché au produit 15
8. Code pour l'aptitude des terres 19
9. Carte de densité des animaux en Afrique 21
10. Distribution de la poussière apportée par l'Harmattan en Afrique de l'Ouest 26
11. Représentation schématique d'un algorithme à flux multiple 33
12. Carte d'érosion-sédimentation du Kenya 34
13. Flux d'éléments nutritifs au sein d'une exploitation au Mali-Sud 44
14. Carte simulée d'utilisation des terres du Ghana 47
15. Bilan de l'azote au Ghana, par cellule d'1-km (gauche) et par cellule agrégée de 20 km (droite) 48
16. Carte simulée d'utilisation des terres au Kenya 49
17. Bilan de l'azote pour le Kenya, par cellule d'1-km (gauche) et par cellule agrégée de 20-km (droite) 49
18. Carte simulée d'utilisation des terres au Mali 51
19. Bilan de l'azote pour le Mali, par cellule d'1-km (en haut) et par cellule agrégée de 20-km (en bas) 51
20. Vue d'ensemble des flux d'azote pour le Ghana, le Kenya et le Mali 52
21. Bilan des éléments nutritifs totaux pour les districts de Nkawie et Wassa Amenfi 52
22. Flux d'azote dans les deux districts au Ghana 53
23. Flux d'azote dans la zone «théier – caféier – laiterie» du district d'Embu 54
24. Flux d'azote pour trois cultures principales, district d'Embu 54
25. Flux d'azote dans le système de production à base de cotonnier, région de Koutiala 55
26. Flux d'azote pour trois cultures principales, région de Koutiala 56
27. Flux d'azote au niveau d'une exploitation agricole par zone agroécologique 56
28. Bilan des éléments nutritifs en relation avec les stocks d'éléments nutritifs dans le sol 57
29. Bilan de l'azote au niveau d'une exploitation par zone agroécologique 58
30. Perte de productivité de l'engrais sur le maïs au Kenya 74

Liste des tableaux

1. Caractéristiques de la couche superficielle (0-20 cm) des sols pour les différentes zones agroécologiques 6
2. Données de production et d'exportation de cacao au Ghana 9
3. Caractéristiques des zones agro-écologiques du district d'Embu 10
4. Données de production et d'exportation du thé au Kenya 11
5. Données de production et d'exportation du café au Kenya 11
6. Données de production pour le lait au Kenya 13
7. Données de production et d'exportation pour le coton au Mali 16
8. Ordre des cultures pour la procédure d'élaboration de la carte d'utilisation des terres 20
9. Nombre d'animaux par pays 22
10. Excrétion 22
11. Teneur en éléments nutritifs du fumier (poids frais) 22
12. Teneur en éléments nutritifs de l'eau de pluie 24
13. Teneur en éléments nutritifs de la poussière apportée par l'Harmattan 25
14. Quantités de poussière apportées par l'Harmattan à différents endroits 25
15. Teneur en éléments nutritifs des produits récoltés, des résidus de récolte et coefficients d'exportation des résidus de récolte 28
16. Surfaces en jachère pour le Ghana, le Kenya et le Mali 35
17. Surfaces récoltées et fumier pour chaque culture dans deux districts, Ghana 38
18. Érosion estimée par culture pour un système à base de cacao 39
19. Propriétés des sols pour les zones agroécologiques les plus hautes du district d'Embu 39
20. Doses d'application d'engrais minéral, district d'Embu 40
21. Érosion estimée par culture, district d'Embu 41
22. Propriétés des sols de bas de pentes dans la Région de Koutiala 41
23. Utilisation des résidus de récolte dans la région de Koutiala 42
24. Taux d'érosion estimés pour la région de Koutiala 42
25. Comparaison des données et procédures pour le calcul des flux d'éléments nutritifs pour chaque niveau 45
26. Bilan des éléments nutritifs par culture et total, Ghana 48
27. Bilans des éléments nutritifs par culture et total, Kenya 50
28. Bilans des éléments nutritifs par culture et total, Mali 50
29. Bilans des éléments nutritifs pour le district de Nkawie 53
30. Bilans des éléments nutritifs pour le district de Wassa Amenfi 53
31. Bilans des éléments nutritifs pour la zone «théier – caféier - laiterie» district d'Embu 55
32. Bilan des éléments nutritifs pour la région de Koutiala 55
33. Bilan d'éléments nutritifs par ZAE 56
34. Propriétés des sols pour toutes les exploitations agricoles et ZAEs 57
35. Coefficients de variation moyens pour les propriétés des sols 58
36. Caractéristiques de M'Peresso et Noyaradougou 59
37. Surfaces moyennes cultivées par exploitation agricole dans deux villages du Mali 59

38. Quantités moyennes d'engrais minéral utilisé dans deux villages, Mali 59
39. Différences observées entre les deux villages, Mali 60
40. Bilan partiel des éléments nutritifs pour les deux villages, Mali 60
41. Bilan partiel de l'azote pour différentes classes et villages, Mali 60
42. Diminution des éléments nutritifs, comparaison entre la présente étude (2003) et Stoorvogel et Smaling (1990) 61
43. Améliorations dans la méthode de calcul par rapport à l'étude de 1990 62
44. Comparaison du bilan d'éléments nutritifs entre le niveau global et le niveau intermédiaire 63
45. Comparaison des surfaces récoltées pour la région de Koutiala 63
46. Bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire 65
47. Coût et bénéfices de l'épuisement des éléments nutritifs 75

Avant Propos

En Afrique subsaharienne, beaucoup d'attention a été concentrée sur la quantification et l'évaluation des éléments nutritifs entrant et sortant des systèmes agricoles, le bilan montrant si le système agricole est un accumulateur ou un déficitaire net en matière de fertilité du sol. La Division du développement des terres et des eaux de la FAO est concernée par le développement de la technologie, de la stratégie et de la politique, et la fourniture de conseils et de services techniques aux membres de la FAO. Ses programmes incluent des activités liées à l'amélioration de la fertilité du sol et de la productivité de la terre pour la production alimentaire; l'évaluation de la dégradation de la terre dans les zones sèches et la compilation des bases de données régionales d'utilisation des terres à différentes échelles sont des éléments de base.

Les modèles de bilan d'éléments nutritifs du sol quantifient les flux des entrées et des sorties d'éléments nutritifs pour des systèmes allant d'une expérimentation de niveau détaillé jusqu'au niveau global. Jusqu'ici, la plupart des études de tels systèmes se sont concentrées sur le niveau détaillé ou le niveau global. Elles ont fourni des données et des résultats utiles pour les décideurs opérant au niveau national et international et pour les chercheurs et différents exploitants agricoles dans des réalités limitées. Leur contribution au corps de la connaissance ne devrait pas être sous-estimée. Cependant, ils ont tendence à ignorer un niveau intermédiaire qui est important pour de plus grands groupes d'exploitants agricoles, les parties prenantes, les décideurs politiques et les planificateurs opérant au niveau d'une province, d'un district, d'une zone agroécologique ou d'un système agroéconomique (par exemple un système de production basé sur le cotonnier). Ce niveau se nomme donc niveau intermédiaire.

Dans les pays africains tels que le Ghana, le Kenya et le Mali, le niveau intermédiaire est le niveau où on peut faciliter la production et où un secteur privé en développement peut investir dans un produit ou un système de production. Il fournit également un point d'entrée utile pour les décideurs politiques au niveau régional.

Remerciements

Ce travail est le résultat d'une coopération entre de nombreux experts de différentes disciplines. Le rapport a été préparé par J.P. Lesschen, J.J. Stoorvogel et E.M.A. Smaling. La publication a bénéficié des commentaires et des données de J. Johnston (Rothamsted, Royaume Uni), J. Poulisse et de T. Van Den Bergen, A.P. Koohafkan et R. Roy de la FAO, et des collaborateurs et co-auteurs des partenaires nationaux: R.D. Asiamah et O. Dwomo de l'Institut de recherche sur les sols du Ghana, M.R. Appiah et K. Ofori-Frimpong de l'Institut de recherche sur le cacao du Ghana, P. Gicheru de l'Institut de recherche agricole du Kenya, et S. Kanté de l'Institut d'Economie Rurale du Mali.

Un remerciement spécial va à Lynette Chalk pour sa préparation et à Denis Montange pour la version française.

Préface

Une étude de 1990 au niveau global qui indiquait une baisse de la fertilité des sols en Afrique a déclenché des études de cas au niveau détaillé sur les flux d'éléments nutritifs. Ce rapport fait l'hypothèse qu'une approche de niveau intermédiaire peut offrir un point d'entrée valide pour les décideurs politiques et l'intervention du secteur privé. Le but est de permettre aux personnes intéressées de niveau intermédiaire de mieux articuler et cibler les mesures spécifiques augmentant la fertilité du sol à cette échelle.

Le rapport synthétise des études sur les stocks, les flux et les bilans d'éléments nutritifs du sol afin de calculer des bilans au niveau intermédiaire pour le Ghana, le Mali et le Kenya. Il explique les calculs de flux d'éléments nutritifs, montre comment construire les bilans d'éléments nutritifs de niveau intermédiaire et présente les différences entre les niveaux et entre les trois pays.

L'approche de niveau intermédiaire peut prendre en considération des décisions spécifiques de gestion ainsi que des différences physiographiques, et aider à cibler des interventions sur la base des variations de gestion des éléments nutritifs au niveau détaillé. En particulier, elle peut identifier des contraintes, utiliser les flux d'éléments nutritifs pour la planification, et extrapoler des résultats à d'autres secteurs.

Ce rapport a été préparé pour le projet de la FAO «Bilans des éléments nutritifs des sols à différentes échelles». Le projet a commencé en janvier 2002 avec une revue de la littérature existante et la collecte des données. Trois études de cas au niveau de pays ont été sélectionnées et la coopération a commencé avec les instituts de recherche nationaux, à savoir: au Ghana, le «Soil Research Institute» et le «Cocoa Research Institute of Ghana», le «Kenya Agriculture Research Institute» au Kenya et l'Institut d'Economie Rurale au Mali. En février 2003, un atelier de deux jours à Nairobi a présenté les résultats préliminaires du projet.

Acronymes

ASS	Afrique subsaharienne
CEC	Capacité d'Échange Cationique
CLUE	Conversion of land use and its effects (Changement d'utilisation de la terre et ses effets)
CMDT	Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles
CRIG	Cocoa Research Institute of Ghana (Institut de recherche sur le Cacao au Ghana)
CV	Coefficient de variation
DAP	Phosphate Di-ammonique
FBA	Fixation Biologique de l'Azote
IFA	International Fertilizer Industry Association (Association internationale des producteurs d'engrais)
IFDC	International Fertilizer Development Center (Centre international de développement des engrais)
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis (Institut international pour l'analyse de systèmes appliqués)
INM	Integrated Nutrient Management (Gestion intégrée des éléments nutritifs)
ISFM	Integrated Soil Fertility Management (Gestion intégrée de la fertilité des sols)
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre (Centre international de référence et d'information sur les sols)
K	Potasse
KCC	Kenya Co-operative Creameries: Laiteries coopératives du Kenya
LAPSUS	LandscApe ProcesS modelling at mUltidimensions and Scales
MNT	Modèle Numérique de Terrain (= DEM Digital Elevation Model)
N	Azote
NH_3	Ammoniac
NUTMON	Nutrient monitoring (Gestion des éléments nutritifs)
P	Phosphore
QUEFTS	Quantitative evaluation of the fertility of tropical soils (Estimation quantitative de la fertilité des sols tropicaux)
SIG	Système d'Information Géographique
SPIR	Spectrométrie Proche Infra Rouge
TSP	Superphosphate Triple
USGS	United States Geological Survey
WISE	World inventory of soil emission potentials (Inventaire mondial des potentiels d'émission par les sols)
ZAE	Zone agroécologique

Glossaire

Agriculture durable: Systèmes agricoles et agroalimentaires qui sont économiquement viables et répondent aux besoins d'une société d'avoir une alimentation sûre et nourrissante, tout en conservant ou augmentant les ressources naturelles et l'environnement pour les générations futures.
Agroforesterie: Tout type d'utilisation de la terre en culture multiple qui entraîne des relations complémentaires entre l'arbre et les cultures agricoles et produit une certaine combinaison de nourriture, de fruit, de fourrage, de combustible, de bois, de paillis ou d'autres produits.
Bilan d'éléments nutritifs: La différence entre les apports totaux et les sorties d'éléments nutritifs au niveau des terres agricoles.
Capacité d'échange cationique (CEC): Une mesure de la capacité des sols à lier des ions chargés positivement (cations), qui incluent beaucoup d'élément nutritifs importants (calcium, magnésium et potassium). La CEC dépend de la quantité et du type d'argile et de la quantité et du degré d'humification de la matière organique dans le sol.
Compost: Mélange de matière organique décomposée et en voie de décomposition contenant des éléments nutritifs disponibles utiles pour la fertilisation des cultures.
Dénitrification: Réduction des oxydes d'azote (habituellement nitrate et nitrite) en azote moléculaire ou en oxydes d'azote avec un état d'oxydation inférieur de l'azote par des activités bactériennes (dénitrification) ou par des réactions chimiques impliquant les nitrites (chimiodénitrification).
Éléments nutritifs disponibles: La quantité d'éléments nutritifs du sol sous des formes chimiques accessibles aux racines des plantes, ou de composés susceptibles d'être convertis en de telles formes pendant la période de croissance.
Engrais: Tout matériau organique ou minéral d'origine naturelle ou synthétique (autre que les matériaux de chaulage) qui est ajouté à un sol pour fournir un ou plusieurs éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes.
Fertilité du sol: La qualité d'un sol qui lui permet de fournir des quantités adéquates d'éléments nutritifs, dans un équilibre approprié, pour la croissance de plantes ou de cultures.
Fixation biologique de l'azote: La fixation par des cellules bactériennes de l'azote gazeux atmosphérique et son incorporation dans des composés organiques utiles pour la vie. Les bactéries fixatrices d'azote existent dans le sol et en association ou en symbiose avec des plantes et des champignons.
Flux d'éléments nutritifs: Flux d'éléments nutritifs d'une unité vers une autre. Cette étude définit l'unité principale comme étant le sol agricole sur toute la profondeur d'enracinement.
Fumier: Les déjections des animaux, avec ou sans mélange de litière, bruts ou à diverses étapes de décomposition ou de compostage.

Gestion du sol: La totalité des opérations de travail du sol et de semis/plantation, les pratiques culturales, la fertilisation, le chaulage, l'irrigation, l'application d'herbicide et d'insecticide, et d'autres traitements conduits sur - ou appliqués à - un sol pour la production agricole.
Gestion intégrée de la nutrition (= Integrated Nutrient Management, INM): Gestion judicieuse des stocks d'éléments nutritifs et de leurs flux afin d'obtenir un niveau satisfaisant et durable de production agricole avec un coût environnemental minimum.
Jachère: Terres arables non inclues dans la rotation et qui sont mises de côté pour 1 à 5 ans avant d'être cultivées à nouveau, ou terres portant habituellement des cultures permanentes, des prés ou des pâturages qui ne sont pas employées dans ce but pendant au moins une année. Cela inclut les terres arables normalement utilisées pour des cultures temporaires mais converties en pâturage pendant une certaine période.
Niveau détaillé: Un niveau bas qui correspond au niveau du village ou de l'exploitation.
Niveau global: Un niveau élevé qui correspond au niveau continental ou national.
Niveau intermédiaire: Un niveau intermédiaire qui correspond au système de production, au niveau de la région ou du district.
Sécurité alimentaire: Une situation qui existe là où toutes les personnes ont à tout moment l'accès physique, social et économique à une alimentation suffisante, sûre et nourrissante qui répond à leurs besoins et préférences en matière de nourriture pour une vie active et saine.
Stocks d'éléments nutritifs: Quantité d'éléments nutritifs dans une certaine unité, par exemple le sol ou un tas de fumier.
Système de production: Population de systèmes d'exploitations agricoles individuelles qui ont globalement des bases de ressources, des modèles d'entreprise, des conditions de vie des ménages et des contraintes comparables, et pour lesquelles des interventions et des stratégies similaires de développement seraient appropriées. Selon l'échelle de l'analyse, un système de production peut comprendre quelques douzaines ou plusieurs millions de ménages.
Volatilisation: La transformation en gaz de substances non gazeuses dans un système défini et la perte de ce gaz par le système défini. Par exemple, la perte d'ammoniac gazeux par un sol fertilisé à l'azote.
Zone Agroécologique (= Agro Ecological Zone, AEZ): La FAO définit et délimite des ZAEs sur la base de la durée annuelle moyenne de la période de croissance pour les cultures, qui dépend, entre autres, des précipitations et de la température.

Chapitre 1
Introduction

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Au même niveau que la disponibilité de l'eau et l'absence de mauvaises herbes, de parasites et de maladies, la fertilité du sol est le facteur biophysique le plus important déterminant le rendement. Sous les tropiques, les sols sont généralement plus anciens et plus pauvres que dans l'hémisphère Nord. Ceci se vérifie en particulier pour les vastes plaines d'érosion d'Afrique. Dans beaucoup d'endroits, la fertilité déjà basse tend à diminuer encore plus du fait que les exploitants agricoles induisent beaucoup de sorties d'éléments nutritifs lors des récoltes et du fait de processus tels que la lixiviation et l'érosion sans apport d'intrants adaptés sous forme d'engrais, de fumier ou de fixation biologique d'azote. Les pays qui suivent des programmes d'ajustement structurel ont supprimé les subventions sur les engrais, ayant ainsi pour résultat une réduction significative de leur utilisation sur des cultures alimentaires primordiales. Pour les cultures de rente, leur utilisation dépend considérablement des prix du marché mondial, qui prennent en compte l'offre et la demande et les attitudes par rapport à la protection du marché.

Au cours des dix dernières années, en Afrique subsaharienne (ASS), beaucoup d'attention s'est concentrée sur la quantification et l'estimation des éléments nutritifs qui entrent et sortent des systèmes agricoles. Le bilan entre les entrées et les sorties d'éléments nutritifs indique si le système agricole gagne ou perd de la fertilité du sol. Une étude au niveau global, à la demande de la FAO, (Stoorvogel et Smaling, 1990), qui a calculé les bilans de N, P et K à l'échelle du système d'utilisation de la terre et du pays, a indiqué que la fertilité des sols en Afrique évolue à la baisse. Les pays densément peuplés et montagneux dans la région de la vallée du Rift (Kenya, Ethiopie, Rwanda et Malawi) ont les bilans les plus déficitaires, en raison de la forte proportion des terres cultivées par rapport aux terres arables totales, des rendements relativement élevés des cultures et de l'érosion des sols.

Ce rapport a déclenché de nombreuses études de cas aux niveaux de la parcelle, de l'exploitation agricole et du village avec différents degrés de sophistication. Certaines études se sont concentrées sur la mesure de quelques flux, d'autres sur la liaison entre le bilan des éléments nutritifs et la performance économique de l'exploitant agricole, et d'autres encore sur l'apprentissage participatif et l'action vers une amélioration de la fertilité du sol et sa gestion. Les résultats sont disponibles dans des livres, des numéros spéciaux de journaux (par exemple Buresh *et al*, 1997; Smaling, 1998; Smaling *et al*, 1999; Hilhorst et Muchena, 2000; Scoones, 2001; Tian *et al*, 2001; Vanlauwe *et al*, 2002), des thèses de M.Sc. et Ph.D.,

une «boîte à outils» et un site Web (http://www.nutmon.org). La connaissance du sujet s'est développée de manière significative, mais la liaison avec les politiques de fertilité des sols est modeste (Scoones et Toulmin, 1999). Les meilleurs enjeux et pratiques actuellement suggérés proviennent des expériences locales plutôt que d'une analyse complète des contraintes. Les politiques pour la fertilité du sol et sa gestion évoluent principalement aux niveaux national et régional.

Il est nécessaire de développer des points d'entrée à un niveau plus bas que «continent» et «pays». La carte de fertilité des sols d'un pays montre des secteurs avec des sols plus riches et d'autres plus pauvres, mais ne fournit aucune indication pour les personnes intéressées de niveau intermédiaire et les exploitants agricoles. De même, de telles cartes ne montrent pas la diversité au niveau de l'exploitation agricole. La présente étude fait l'hypothèse qu'entre le niveau du pays et le niveau de l'exploitation agricole, il y a un niveau intermédiaire important, où l'assistance à la production peut avoir lieu, et où le secteur privé peut investir dans un produit ou un système de production. Par conséquent, l'évaluation de la fertilité du sol et l'intervention sur les flux d'éléments nutritifs, c'est à dire la gestion intégrée de la nutrition (INM), devrait avoir lieu à trois niveaux d'espace adaptés, qui sont également des niveaux spécifiques pour les personnes intéressées.

Cette étude emploie trois niveaux d'échelle: niveau global, intermédiaire et détaillé. Ces niveaux d'échelle ne sont pas fixés, mais fournissent une indication de l'ordre de grandeur. Cette étude définit le niveau global comme étant la nation, mais elle peut également se rapporter à un niveau continental ou mondial de système de culture (FAO, 2001b). Le calcul du bilan des éléments nutritifs au niveau global emploie des données qui sont disponibles pour chaque pays, telles que les données de FAOSTAT et des bases de données des systèmes mondiaux d'information géographique (SIG). Ceci rend l'approche applicable en principe pour chaque pays. Le niveau intermédiaire coïncide avec le niveau de la province, du district ou de la zone agroécologique (ZAE). Cette étude définit le niveau intermédiaire en tant qu'entité agro-économique plutôt que géographique, par exemple les systèmes de production basés sur le coton ou les produits laitiers. De telles entités ont souvent une composante commerciale qui permet l'intensification et le développement. Les études au niveau de l'exploitation agricole indiquent que l'existence d'une composante d'économie de rente dans les systèmes de production tend à améliorer la gestion de la fertilité du sol, et constitue un point d'entrée approprié pour l'intervention des politiques et du secteur privé. En conclusion, cette étude définit le niveau détaillé comme le niveau de l'exploitation agricole ou du village, mais il peut s'étendre à un groupe de gestion des éléments nutritifs ou un groupe de personnes du même genre.

L'innovation dans ce rapport est l'introduction d'un niveau intermédiaire, et l'hypothèse est que cela ajoute de la valeur à la connaissance courante des niveaux global et détaillé. Cependant, les données de niveau intermédiaire proviennent en grande partie des données du niveau global et du niveau détaillé parce que la plupart des études et des données sont disponibles à ces échelles. Par conséquent, il est nécessaire d'appliquer des procédures pour déconcentrer des données

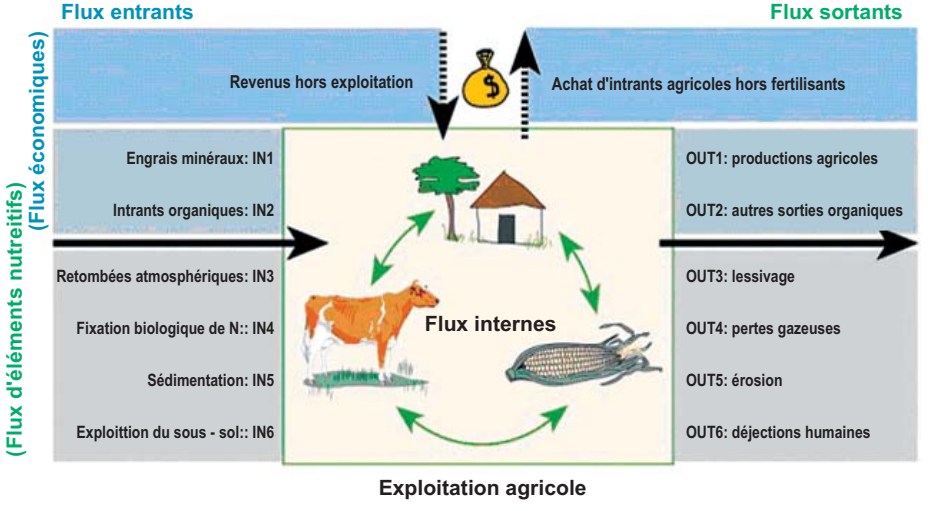
nationales afin de montrer la variabilité spatiale dans un pays. En même temps, il est également nécessaire d'agréger des résultats d'études réalisées au niveau des exploitations agricoles sans faire la moyenne et sans négliger la variabilité dans les systèmes de production complexes.

LE MODÈLE DE BILAN DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS

Le bilan des éléments nutritifs correspond à la somme des entrées moins le total des sorties d'éléments nutritifs dans un «système». Ce système représente toujours une échelle spatiale particulière, qui peut s'étendre d'un petit agrégat de sol jusqu'au monde entier.

La figure 1 montre les flux possibles d'éléments nutritifs qui pourraient influencer un bilan. Les flux IN1 et OUT1 et, à un moindre degré, IN2 et OUT2 sont appelés des «flux faciles» parce qu'ils sont relativement faciles à mesurer ou à calculer, et il est possible d'exprimer leurs valeurs en termes monétaires. Les autres flux sont des «flux difficiles», qui ne sont normalement pas mesurés en routine, et moins facilement récupérables dans les statistiques agricoles. De plus, les estimations économiques prennent rarement en compte leurs effets physiques ou ceux hors-site. Ce rapport prend en compte les flux IN6 et OUT6 seulement au niveau détaillé. Sur une surface plus grande, IN6 est trop difficile à mesurer et la prise en compte de OUT6 entraînerait un double comptage, étant donné que tous les éléments nutritifs dans les produits récoltés se retrouvent dans OUT1. Il est possible de calculer un bilan d'éléments nutritifs pour chaque niveau d'échelle. Cependant, comme les limitations de données entre les niveaux sont différentes,

FIGURE 1
Flux d'éléments nutritifs et flux économiques influençant le bilan des éléments nutritifs et le budget de l'exploitation



Source: d'après De Jager *et al.*, 1998.

les procédures de calcul diffèrent également. Cette étude a pris en compte tous les niveaux seulement pour ce qui est de N, P et K. Quand les bases de données exprimaient P et K sous forme de P_2O_5 et K_2O, les valeurs ont été divisées par 2,3 et 1,2 respectivement.

La détermination d'un bilan d'éléments nutritifs a ses imperfections. D'abord, cela montre les résultats d'un bilan statique d'entrées-sorties, mais ne tient pas compte des changements dans les stocks d'éléments nutritifs. En second lieu, l'application fait un usage intensif de données. Troisièmement, étant donnée la grande diversité des exploitations agricoles, la méthodologie d'échantillonnage, la densité des échantillons, et leur représentativité deviennent des problèmes pour ce qui est de la façon d'agréger les résultats du niveau des exploitations agricoles vers un niveau régional ou national. Les flux d'éléments nutritifs peuvent fournir un outil utile pour la compréhension par l'exploitant agricole des problèmes de gestion des sols, mais les interventions doivent toujours être profitables. De plus, réaliser un budget concernant les éléments nutritifs fournit un modèle pour un budget économique et, en conséquence, pour comprendre les plus importants facteurs déterminant les procédures de gestion des sols pour les exploitants agricoles (Lynam *et al.*, 1998).

OBJECTIF

L'objectif de ce rapport est de passer en revue et de synthétiser les études existantes sur les stocks d'éléments nutritifs dans les sols, les flux et les bilans aux niveaux global et détaillé, et de calculer les bilans d'éléments nutritifs au niveau intermédiaire pour trois pays de l'Afrique Subsaharienne (Ghana, Kenya et Mali). La «large vue» du niveau global devrait permettre de cibler des technologies profitables pour la fertilité du sol au niveau intermédiaire, en tenant compte de la diversité fonctionnelle du niveau détaillé. En tant que tel, l'objectif final du projet est de fournir une méthodologie pour les personnes intéressées au niveau intermédiaire afin d'améliorer la liaison et cibler les mesures spécifiques augmentant la fertilité du sol, en s'assurant ainsi que les politiques de sécurité alimentaire sont durables à plus long terme. Cette méthodologie peut alors également entrer dans les programmes normatifs de la FAO.

STRUCTURE

Le rapport se compose de cinq chapitres et d'un certain nombre d'annexes. Le chapitre 2 décrit le choix des trois pays, les secteurs d'étude et les différents systèmes de production pour tester la méthode de niveau intermédiaire. Le chapitre 3 explique la méthodologie pour calculer les flux d'éléments nutritifs aux différentes échelles. Les chapitres 4 et 5 présentent et commentent les résultats des calculs de bilan d'éléments nutritifs pour les différents niveaux. Les spécialistes en fertilité du sol et les personnes intéressées au niveau intermédiaire ont commenté les résultats lors d'un atelier rassemblant 27 participants à Nairobi (17-18 février 2003). Le chapitre 5 incorpore les résultats de l'atelier, alors que l'annexe 11 contient les résumés des présentations des participants à l'atelier.

Chapitre 2
Description de la zone d'étude

CHOIX DU PAYS ET DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Étant donné le caractère pilote de l'étude, les critères suivants ont déterminé le choix de trois pays africains:

- la disponibilité relative de données sur la fertilité des sols et les bilans d'éléments nutritifs des sols au niveau intermédiaire et au niveau détaillé devaient être différents,
- les pays devaient représenter les principales zones agroécologiques et les paysages d'Afrique subsaharienne,
- les pays devaient avoir des systèmes de production avec une culture de rente ou une autre composante agricole orientée vers le marché.

Ces critères ont amené à choisir le Ghana, le Kenya et le Mali, pays qui peuvent être caractérisés ainsi:

Ghana:

- peu de données disponibles
- représentatif du système de production «arbre-culture» (FAO, 2001b)
- la production de cacao représente 11,9 pour cent de la production mondiale
- le système de production est à base de cacao dans les districts de Nkawie et de Wassa Amenfi
- groupes locaux de recherche: Soil Research Institute (institut de recherche sur les sols) et Cocoa Research Institute of Ghana (institut de recherche sur le cacao du Ghana - CRIG).

Kenya:

- bonne disponibilité des données
- représentatif des systèmes de production mixte tempérée de montagne et à base de maïs (FAO, 2001b).
- les productions de thé et de café représentent respectivement 8,6 et 1,0 pour cent de la production mondiale
- système de production théier-caféier-laiterie dans le district d'Embu
- groupe local de recherche: Kenya Agriculture Research Institute (Institut de recherche agricole du Kenya).

Mali:

- disponibilité moyenne des données
- représentatif du système agropastoral de production «mil-sorgho» (FAO, 2001b)
- la production de coton représente 1,0 pour cent de la production mondiale
- systèmes de production à base de coton dans la région de Koutiala (Compagnie Malienne pour le Développement des Textiles: CMDT).

TABLEAU 1
Caractéristiques de la couche superficielle (0-20 cm) des sols pour les différentes zones agroécologiques

Zone	pH (H_2O)	C (g/kg)	N (g/kg)	CEC (cmol/kg)	Saturation en bases (pour cent)	P disponible (mg/kg)	P Total (mg/kg)
Forêt équatoriale	5,6	22,5	1,6	9,2	29	12,1 (Bray I)	413
Savane nord guinéenne	5,8	12,1	1	7,1	69	2,9 (Bray I)	367
Hautes Terres Tropicales	4,5	-	6,1	22,5	-	2,9 (Olsen)	2 068

Sources: Données pour les zones de Forêt équatoriale et de Savane nord guinéenne adaptées de Windmeijer et Andriesse, 1993; Données pour les Hautes Terres Tropicales de Smaling *et al.,* 2002 (moyenne de ZAE1-ZAE3).

➢ groupe local de recherche: Institut d'Économie Rurale

Les trois secteurs d'étude sont dans des Zones agro-écologiques différentes. Les deux districts du Ghana font partie de la Zone forestière équatoriale d'Afrique de l'Ouest avec des précipitations élevées et bimodales. Cette zone a une saison de culture de plus de 270 jours et des sols épuisés avec une faible saturation en bases (tableau 1). Le district d'Embu au Kenya fait partie de la Zone des hautes terres tropicales d'Afrique de l'Est. En raison de l'origine volcanique du secteur, les sols sont relativement fertiles. Le P disponible est faible du fait de la fixation du phosphore. Les précipitations augmentent avec l'altitude et ont une distribution bimodale. Ceci a comme conséquence une saison de culture de plus de 270 jours. La région de Koutiala au Mali appartient à la Zone de la savane nord guinéenne de l'Afrique de l'Ouest, caractérisée par une distribution monomodale des précipitations (900-1 500 mm/an). Ceci a comme conséquence une période de croissance s'étendant de 165 jours dans le nord à 270 jours à la frontière méridionale (Windmeijer et Andriesse, 1993). Les sols sont sableux et très pauvres en éléments nutritifs (tableau 1).

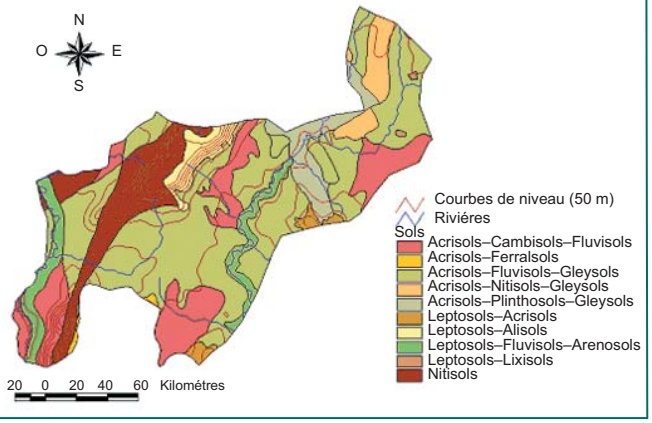
GHANA

Au Ghana, des plantes telles que le mil et le sorgho sont cultivées dans le nord, région plus sèche du pays, alors que le manioc et le cacaoyer poussent dans le sud, région plus humide. Le cacaoyer est la culture la plus importante dans le pays pour ce qui est de la surface cultivée, des exportations et de l'emploi.

Les secteurs choisis pour l'analyse au niveau intermédiaire étaient le district de Nkawie dans la région Ashanti et le district de Wassa Amenfi dans la région occidentale. Bien que le district de Nkawie soit mieux adapté au cacaoyer, il y a eu une grande expansion de cette culture dans le district de Wassa Amenfi dans les dernières décennies en raison de la pénurie de terre dans la région Ashanti. Le district de Wassa Amenfi est situé dans le sud-ouest du Ghana et a des précipitations annuelles plus élevées que le district de Nkawie, ce qui est moins favorable pour la production du cacao. Les principaux sols dans le district de Wassa Amenfi sont des Ferralsols pauvres et fortement lixiviés, par rapport aux Acrisols plus fertiles du district de Nkawie (figures 2 et 3). Les rendements en cacao dans les deux districts sont semblables malgré leurs aptitudes différentes. Les différences dans l'historique de l'utilisation des terres dans les deux districts peuvent expliquer cela. Les sols

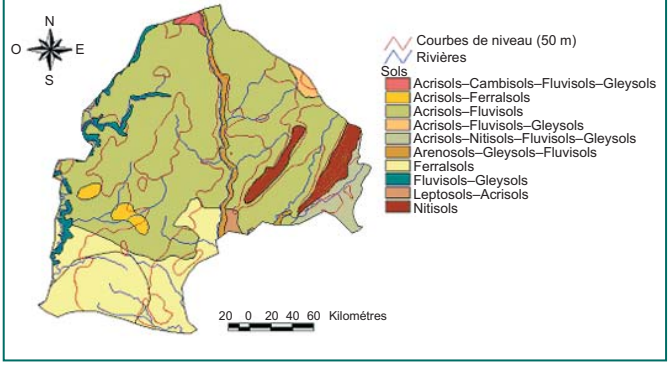
du district de Nkawie ont été utilisés de manière plus intensive et pendant une plus longue période que ceux du district de Wassa Amenfi, ces derniers pouvant encore contenir une partie des éléments nutritifs libérés après le défrichement de la forêt. Le paysage dans cette partie du Ghana consiste principalement en un relief ondulé, avec des Acrisols et des Ferralsols au sommet et sur les pentes, et des Gleysols et des Fluvisols en fond de vallée. Les cacaoyers sont principalement cultivés sur les pentes et au sommet, parce que les secteurs de fond de vallée sont trop humides pendant la saison des pluies (Adu, 1992).

FIGURE 2
Carte des sols du district de Nkawie



Source: Soil Research Institute, 1999.

FIGURE 3
Carte des sols du district de Wassa Amenfi



Source: Soil Research Institute, 1999.

Système de culture à base de cacao

La culture du cacaoyer couvre presque 30 pour cent des terres arables. Les principales régions productrices sont situées dans le centre et le sud-ouest du Ghana. Les meilleures conditions pour le cacaoyer sont un sol perméable avec une bonne structure, des précipitations annuelles de 1 250 à 1 500 millimètres et un sol ayant un pH de 5,6 à 6,5. L'exploitation agricole moyenne de cacaoyer couvre 1,2 ha. Il y a quelques grandes plantations de cacaoyers au Ghana. La plupart des exploitants agricoles considère que le cacaoyer est une culture à faible niveau d'intrants et n'applique pas d'engrais. Les apports d'engrais minéraux et organiques sont réservés aux cultures annuelles telles que le maïs, les plantains et les ignames. L'échec de ces cultures signifie que les exploitants agricoles perdent la totalité de leur investissement (graines, engrais, pesticides, etc.), alors que le cacaoyer, culture pérenne, fournit une récolte tous les ans.

La production de cacao sans ombrage est faible en l'absence d'engrais. Les agriculteurs brûlent généralement de petites parties de la forêt secondaire pour

ouvrir de nouvelles terres pour le cacaoyer. Après défrichement, ils cultivent les cacaoyers en association avec le maïs, l'igname, les plantains et le manioc. Dans les premières années, les plantains se développent rapidement et fournissent de l'ombre. Après cinq ans, les cacaoyers ont développé une canopée fermée et les agriculteurs pratiquent alors la culture comme une monoculture. Les rendements diminuent après 20 ans, mais la production est possible jusqu'à 50 ans. Les exploitants agricoles plantent habituellement 300 à 400 cacaoyers par hectare. Le CRIG conseille de laisser au moins 6 à 8 grands arbres par hectare pour l'ombrage. Ces espèces (de préférence des légumineuses) doivent être choisies pendant le défrichement de la forêt (CRIG, 2001). Là où la canopée n'est pas complète, les exploitants agricoles plantent parfois d'autres arbres légumineuses tels que le *Gliricidia*.

Les agriculteurs enlèvent normalement les branches inférieures des cacaoyers afin d'améliorer la circulation de l'air et faciliter la récolte. Ils laissent normalement ces branches sur le sol, en même temps que toutes les feuilles qui sont tombées. Par conséquent, cela représente une couche épaisse de litière, qui joue un rôle important dans le cycle des éléments nutritifs. Le taux de décomposition est élevé en raison des fortes températures et précipitations (Ofori-Frimpong et Rowell, 1999). La couche de litière protège également le sol contre l'érosion et empêche la croissance des adventices. L'érosion des sols n'est pas un problème répandu dans le secteur du cacao parce que la végétation couvre une grande partie de la terre.

Importance économique

L'industrie du cacao a été le moteur du développement économique et de l'expansion du Ghana du fait de l'emploi de travailleurs ruraux, du développement des échanges et du commerce, de l'épargne, de l'investissement, et de la croissance de l'économie monétarisée (Asante, 1997).

Entre 1990 et 1999, l'industrie a contribué en moyenne pour 31 pour cent des revenus totaux annuels en devises étrangères, ce qui représente en moyenne 12 pour cent des revenus totaux annuels de l'état. C'est la source de revenus et de moyens d'existence pour environ 25 pour cent de la population (ISSER, 2000).

Les petits exploitants dominent l'industrie du cacao au Ghana. Les indices permettent de penser que l'industrie continuera à jouer un rôle significatif dans l'économie nationale. Les efforts pour placer l'industrie sur une base ferme ont été continus. Les gouvernements successifs ont soutenu la culture du cacaoyer par la stabilisation des prix à la production, la mise en place de services de recherche et de vulgarisation pour le contrôle des parasites et des maladies du cacaoyer, et la diffusion des pratiques agronomiques améliorées.

Le rendement moyen en cacao est d'environ 300 kg/ha (tableau 2), ce qui est faible par rapport au rendement potentiel de 1,0 à 1,5 tonne/ha. Plusieurs facteurs ont fait diminuer la production de cacao au Ghana entre 1960 et le milieu des années 1980s. Cependant, un facteur important qui n'a pas attiré beaucoup d'attention est le rapport entre la fertilité du sol et la production de cacao. Appiah *et al.* (1997a)

TABLEAU 2
Données de production et d'exportation de cacao au Ghana

	1970	1980	1990	2000
Surface récoltée (ha)	1 451 000	1 200 000	693 249	1 500 000
Production (tonnes)	406 000	277 200	293 355	436 600
Rendement (kg/ha)	280	231	423	291
Exportation (tonnes)	367 362	194 679	248 970	360 250

Source: FAOSTAT.

ont observé que l'exportation sans remplacement des éléments nutritifs des plantes par les récoltes durant de longues périodes pourrait être une cause importante de la baisse de production du cacaoyer. Une enquête du CRIG en 1990 a montré que pratiquement aucun producteur de cacao au Ghana n'avait inclus l'entretien de la fertilité du sol dans le programme de gestion de leur exploitation agricole (Donkor *et al.*, 1991). Il peut y avoir un recyclage substantiel des éléments nutritifs du fait de la chute de litière et de la décomposition des racines, mais ce ne sont pas des intrants externes.

En 1990, un programme de recherche a commencé à évaluer les implications agronomiques, environnementales, sociales et économiques de l'utilisation d'engrais sur quelques exploitations agricoles paysannes productrices de cacao au Ghana, en incluant le district de Nkawie. Les doses annuelles d'engrais appliquées étaient de 50 kilogrammes de P par hectare et de 64 kilogrammes de K par hectare (Appiah *et al.*, 1997b). Les résultats du travail de recherche au CRIG indiquaient que:

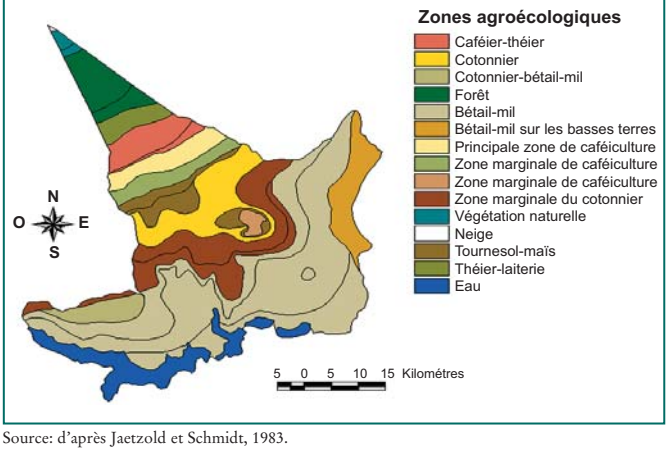
- l'augmentation de rendement due à l'application d'engrais était de 62 pour cent pour la première année, de 100 pour cent pour la deuxième année, de 116 pour cent pour la troisième année et de 107 pour cent pour la quatrième année;
- l'application d'engrais améliorait considérablement les revenus des exploitants agricoles, ce qui également fournit une incitation suffisante pour que des agriculteurs adoptent la technologie;
- l'application d'engrais améliorait les qualités du cacao telles que les dimensions et le poids des fèves;
- l'emploi combiné de l'engrais et du fongicide a considérablement augmenté le rendement dans les zones infestées par la maladie de la pourriture brune des cabosses.

En raison des résultats positifs obtenus à partir des expérimentations, et en conformité avec la stratégie de réduction de la pauvreté du Gouvernement par l'amélioration de la productivité du cacaoyer, le CRIG fournit des conseils techniques à beaucoup de districts afin d'alléger la pauvreté parmi les producteurs de cacao dans les districts. Ce projet a débuté et rassemble des données appropriées pour analyse.

KENYA

Le Kenya a une grande variété de topographies et de climats. Ceci a comme conséquence qu'il existe beaucoup de zones agro-écologiques ainsi que des modes différents d'utilisation de la terre. La plupart des cultures tropicales, sauf les

FIGURE 4
Zones agroécologiques du district d'Embu



Source: d'après Jaetzold et Schmidt, 1983.

cultures arborées sous fortes précipitations, poussent au Kenya. Le caféier et le théier sont les principales cultures de rente et d'importants pourvoyeurs de devises étrangères. Ces cultures sont installées principalement dans l'Ouest du Kenya et sur les pentes du Mont Kenya.

Le secteur d'étude pour la collecte de données au niveau intermédiaire était la zone «théier – caféier - laiterie» du district d'Embu sur les pentes du Mont Kenya. Ce district montre le profil agro-écologique typique du côté au vent du Mont Kenya, depuis les zones basses, chaudes et sèches, dans le bassin de la rivière Tana à 700 m jusqu'aux zones froides, humides, au-dessus de 2 000 m. Les plus hautes terres sont boisées. Le district se compose de cinq zones agro-écologiques différentes (tableau 3). La zone «théier – caféier - laiterie» du district d'Embu est principalement dans la ZAE 2 (figure 4). Les données collectées au niveau du sous-district couvrent les secteurs de Manyatta et de Nembure (partie nord de la division de Runyenjes). Les deux divisions ont une superficie de 219 km^2, dont 195 km^2 sont cultivés (Gouvernement du Kenya, 2001).

Le système de production théier – caféier - laiterie

Le système de production théier – caféier - laiterie dans le district d'Embu existe à des altitudes entre 1 590 et 1 830 m, là où la moyenne pluviométrique annuelle est de 1 250 millimètres et l'évapotranspiration de 1 400 millimètres (Jaetzold et Schmidt, 1983). Les sols dans ce système de production sont principalement des Nitisols bien drainés avec une fertilité modérée (tableau 1). Les exploitants agricoles locaux plantent diverses cultures pour le commerce et leur subsistance. Le secteur est densément peuplé (86 ménages par km^2). Le nombre de petites

TABLEAU 3
Caractéristiques des zones agro-écologiques du district d'Embu

Caractéristique	ZAE 1	ZAE 2	ZAE 3	ZAE 4	ZAE 5
Altitude (m)	1 770	1 590	1 320	980	830
Température moyenne (°C)	16,8	18,2	20,2	21,4	22,6
Pluviosité (mm)	1 750	1 400	1 200	900	800
Principaux types de sol	Andosol/Nitisol	Nitisol	Nitisol	Luvisol	Lixisol
Principales utilisations des terres	Théier/laiterie	Théier/caféier/ laiterie	Caféier/maïs	Tabac/cultures alimentaires	Bétail/cultures itinérantes

Source: d'après Jaetzold et Schmidt, 1983.

TABLEAU 4
Données de production et d'exportation du thé au Kenya

Thé	1970	1980	1990	2000
Surface récoltée (ha)	40 278	76 541	96 981	122 236
Production (tonnes)	41 077	89 893	197 000	236 286
Exportation (tonnes)	41 633	84 455	166 405	217 282

Source: FAOSTAT.

propriétés dans le secteur est d'environ 21 000, soit une surface cultivée moyenne de 0,9 ha par exploitation (Gouvernement du Kenya, 2001).

Thé

Le thé est le deuxième pourvoyeur de devises étrangères du Kenya, contribuant pour plus de 20 pour cent des recettes d'exportations totales du pays (Gouvernement du Kenya, 1995). La production et l'exportation de thé ont augmenté depuis 1970 (tableau 4). Dans le district d'Embu, où les petits exploitants cultivent la majorité des surfaces en théiers, la production de thé a également augmenté. En 1991, la production de thé dans le district était de 22 600 tonnes et elle a grimpé jusqu'à 30 100 tonnes après cinq ans, rapportant aux producteurs un total de 59 millions de $E.U. (Gouvernement du Kenya, 2001). Cependant, il y a différentes contraintes à la culture du thé, par exemple le manque d'accès au crédit, le faible prix du thé au niveau mondial, de mauvaises routes de desserte, un réseau de commercialisation limité et des équipements de stockage inadaptés.

Café

Jusqu'en 1990, l'industrie du café était le principal pourvoyeur de devises étrangères pour le pays, contribuant pour environ 25 pour cent des recettes totales d'exportation du pays (Gouvernement du Kenya, 1995). La production de café a culminé en 1994/95, du fait du fort prix du café au niveau international, du temps propice et des bonnes incitations données aux producteurs. La production et les exportations de café ont ensuite diminué (tableau 5). Les revenus des ventes de café du district d'Embu sont passés de 5,5 millions de $E.U. en 1991 à 12,9 millions de $E.U. cinq ans après (Gouvernement du Kenya, 1998). Divers facteurs ont causé le déclin de la production de café après 1994/95, et parmi ceux-ci, l'application suboptimale des engrais et autres produits chimiques du fait des prix élevés, le flottement du shilling Kenyan par rapport aux principales devises, les bas prix mondiaux du café, les mauvaises infrastructures, le manque d'accès au crédit, la mauvaise gestion des

TABLEAU 5
Données de production et d'exportation du café au Kenya

Café	1970	1980	1990	2000
Surface récoltée (ha)	84 983	102 400	153 100	179 000
Production (tonnes)	58 300	91 334	103 900	100 000
Exportation (tonnes)	53 855	80 334	114 381	86 957

Source: FAOSTAT.

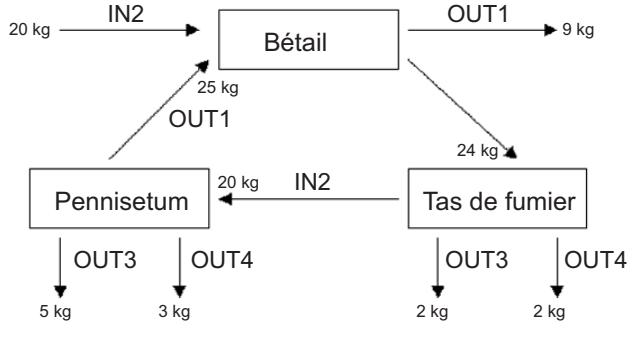
approvisionnements internationaux, et enfin l'arrivée de nouveaux producteurs sur le marché mondial.

Laiterie

Le rôle le plus important des animaux d'élevage est la production, la collecte, la conservation et la concentration des éléments nutritifs au niveau de l'exploitation agricole. Cependant, le mode et l'ampleur du recyclage des éléments nutritifs dépendent du type (grands ou petits ruminants, porcs, lapins et volaille) et du nombre d'animaux disponibles dans un système de production (Lekasi *et al.*, 2002). L'intégration de la culture et de l'élevage du bétail dans la même entité économique fait d'un tel système un système mixte ou un système de gestion culture-bétail. Un avantage important d'un système intégré de production est l'occasion de convertir les sous-produits et les déchets d'une activité en intrants pour une autre. Les animaux fournissent des intrants tels que le fumier pour la production des cultures; des produits agricoles tels que les résidus de récolte et le fourrage sont destinés à la production animale. Les races croisées gardées dans des unités en non-pâturage dominent le système de production laitière de petite taille pratiquée sur les exploitations agricoles de moins de 1 hectare dans la zone «théier - caféier - laiterie» d'Embu.

Le secteur agricole au Kenya a commencé à adopter le système de non-pâturage en 1979 dans un effort pour surmonter les contraintes de la production laitière pour un petit propriétaire, c.-à-d. manque de pâturages, faible productivité des vaches laitières, mauvaise qualité du fourrage, prédominance des maladies, et manque de moyens financiers. Les animaux restent à l'intérieur toute l'année (ce qui empêche la propagation des maladies), et reçoivent du fourrage, principalement de l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), par un système de fauchage et de transport d'herbe coupée (Mango, 2002). La figure 5 montre les flux d'éléments nutritifs entre les principales composantes du système de non-pâturage. Ce système a été couronné de succès dans le district d'Embu.

FIGURE 5
Représentation quantitative des flux d'azote (kg/tête/an) dans un système sans pâturage au Kenya



Source: Van den Bosch *et al.*, 1998b.

La production laitière des petits exploitants au Kenya a été un important succès en Afrique subsaharienne. Du fait de l'accroissement rapide de la population, de l'urbanisation accrue et du potentiel à employer une technologie relativement intensive, l'industrie laitière a donné à beaucoup de petits exploitants des possibilités de revenus plus élevés que d'autres activités agricoles.

TABLEAU 6
Données de production pour le lait au Kenya

Lait	1970	1980	1990	2000
Cheptel bovin	8 600 000	10 000 000	13 793 000	13 794 000
Production (tonnes)	820 037	920 000	2 320 000	2 250 000
Exportation en équivalent lait (tonnes)	50 566	2 361	4 679	2 841

Source: FAOSTAT.

Les laiteries coopératives du Kenya (Kenya Cooperative Creameries - KCC) contrôlent la plupart des laiteries et de la commercialisation des produits laitiers au Kenya. Elles manipulent 90 pour cent de tout le lait traité mis sur le marché et sont les principaux acheteurs au niveau des exploitations agricoles. La production laitière a augmenté sensiblement depuis l'introduction de races exotiques (tableau 6). Le marché informel des produits laitiers est représenté par des ventes directes de lait cru par des producteurs ou des commerçants locaux à différents consommateurs, et des ventes locales de lait cru par les coopératives péri-urbaines et rurales. Environ 60 pour cent du lait commercialisé par des petits exploitants atteignent les consommateurs sous une forme non traitée, via le marché informel (Staal et Shapiro, 1998).

Le Projet national de développement de la laiterie recommandait des vaches à forte production laitière. Avec une absorption d'environ 10 kg de matière sèche par jour et par vache avec des compléments riches en protéines, ces races ont un rendement moyen de 9 kg de lait par jour et par vache. (Mogaka, 1996; Kariuki, 1998).

MALI

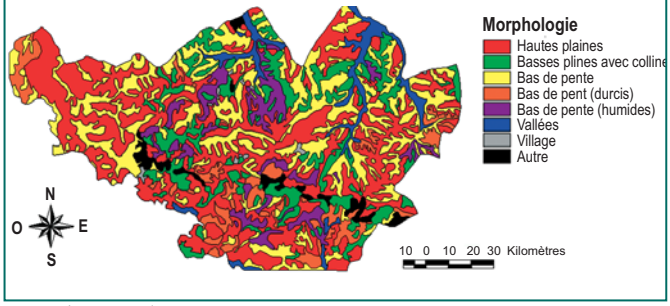
Au Mali, seule la partie du pays au sud du Sahara convient à l'agriculture. Les cultures principales sont le mil, le sorgho, le cotonnier et les légumineuses. Le riz est cultivé majoritairement dans les secteurs temporairement inondés et irrigués le long du fleuve Niger. Le cotonnier est la principale culture de rente au Mali. Pour l'analyse de niveau intermédiaire, cette étude a choisi la région CMDT de Koutiala au Mali Sud. Cette région est le centre de la zone du cotonnier au Mali et produit 30 pour cent du coton malien. La région a une superficie de 18 600 km^2 et une population de presque 600 000 personnes (CMDT, 2000). La région CMDT de Koutiala est plus grande que la région gouvernementale de Koutiala (Cercle de Koutiala). La région CMDT a été choisie du fait que des données plus nombreuses sont disponibles à ce niveau. La plupart des terres agricoles se trouve sur les bas de pentes (figure 6). Les sols dans la région sont principalement des Luvisols et la moyenne pluviométrique annuelle est de 1 040 millimètres.

Le système de production basé sur le coton

Système de production

De grandes parties de la région CMDT de Koutiala ont été utilisées en permanence depuis plus de dix années. Une exploitation agricole moyenne dans cette région exploite 11 ha annuellement pour la production de coton, de céréales et de bétail. Le

FIGURE 6
Carte morphologique du cercle de Koutiala



Source: d'après Sissoko, 1999.

bétail comprend les animaux de trait et également fait fonction de garantie pour les prêts. La surface cultivée a augmenté en rapport avec la population, c.-à-d. de 3 pour cent par an. La surface totale cultivée en 1999 était de 4 940 km², ce qui représente 27 pour cent de la surface totale de la région CMDT de Koutiala. Le reste du secteur était en jachère, en pâturage et en sylviculture.

Système de culture

Les rotations cotonnier - céréale et cotonnier – céréale – céréale dominent le système de culture. Le cotonnier est la principale culture de rente, alors que le sorgho, le mil et le maïs sont les principales cultures vivrières. Les exploitants agricoles locaux emploient des quantités substantielles de fumier, de compost et de résidus domestiques, et appliquent des engrais minéraux sur le cotonnier (Dembélé, 1994).

Système d'élevage

La zone abritait 436 200 têtes de bétail en 1997/98 (CMDT, 1999). La majorité du bétail vit en troupeaux gardés sur les pâturages du début de la saison des pluies jusqu'à la fin de la période de récolte afin de protéger les champs de la destruction. Les moutons, chèvres et ânes restent attachés, alors que les bœufs de trait sont amenés sur les terres en jachère (Bosma *et al.*, 1996). Le pâturage des résidus commence juste après la récolte. Pendant cette période, les animaux de l'exploitation agricole et ceux de l'extérieur peuvent pâturer librement les résidus de récolte (vaine pâture). Beaucoup d'animaux ne survivent pas à la saison sèche en raison de l'insuffisance du fourrage et autre nourriture.

La commercialisation du coton et la logistique

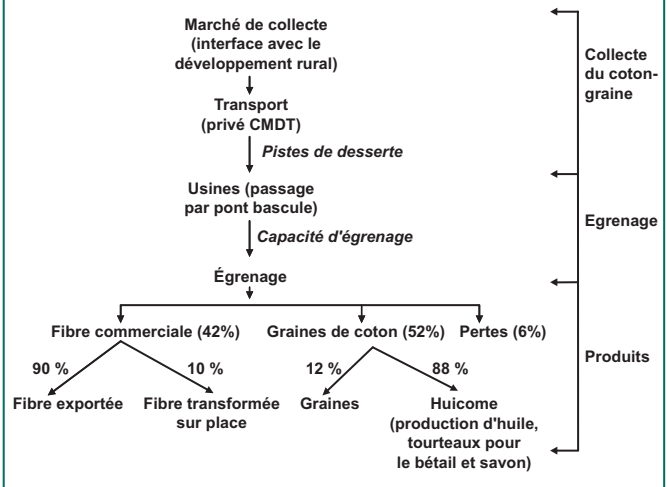
Selon Soumaré (2001), il existe trois principaux systèmes de production de coton dans le monde: (i) gestion monopolistique ou système intégré, (ii) système libéral-contrôlé ou libéral-subventionné et (iii) système complètement libéral.

Gestion monopolistique ou système intégré

C'est un système de production, intégré verticalement produisant et commercialisant du coton fibre et, dans certains cas, de l'huile et du tourteau de coton déshuilé. Ce type d'organisation est structuré autour du principal intéressé (compagnie cotonnière), qui est responsable de l'égrenage des graines de coton et

de la commercialisation de la fibre (figure 7). Ce système a l'avantage d'employer le coton comme outil de développement socio-économique contre la pauvreté, mais le coût de production de la fibre et les charges sont relativement élevées. Ce système existe dans les pays d'Afrique francophone.

FIGURE 7
Système cotonnier: partie industrielle, du marché au produit



Source: CMDT, 1999.

Système libéral-contrôlé ou libéral-subventionné

Ce système implique de subventionner le prix au producteur du coton - graine afin de stimuler la production. Les pays qui pratiquent ce système comprennent les États-Unis d'Amérique, les pays producteurs de coton d'Europe (Espagne et Grèce) et la majorité des autres grands pays producteurs de coton du monde (Inde, Chine et Pakistan). Ce système a l'avantage d'un développement facile de l'industrie cotonnière avec des acteurs professionnels privés, mais il a besoin de l'aide financière de l'état. Par exemple, les États-Unis d'Amérique ont dépensé 1 700 millions de $E.U. pour subventionner leur production de coton en 1992/93 (Soumaré, 2001). L'Egypte, qui est le principal producteur africain, accorde plus de 165 millions de $E.U. de subventions à ses producteurs (Barry, 1998).

Système complètement libéral

Avec le système complètement libéral, les forces du marché contrôlent le fonctionnement du système et stimulent la concurrence entre tous les intéressés. Ce système ne représente aucun poids sur les finances de l'état. Cependant, la production de coton devient instable en absence de protection et de stabilisation, et fluctue selon l'offre et la demande du marché. Le Ghana et le Nigeria emploient ce système. Cela a été un succès en Argentine et en Australie où de grandes exploitations agricoles existent avec la capacité à s'adapter aux réalités du marché.

Le système malien

Avec plus de 520 000 tonnes de coton dans l'année record 1997/98, le Mali est le principal producteur de coton en Afrique subsaharienne. Les exportations croissantes de coton reflètent cet état de fait (tableau 7). Les producteurs de coton maliens ont réalisé ce résultat sans aucun appui de l'état. La clef de ce succès de la CMDT, selon son président, est le caractère intégré du système (figure 7).

TABLEAU 7
Données de production et d'exportation pour le coton au Mali

Coton	1970	1980	1990	2000
Surface récoltée (ha)	65 703	102 352	194 423	227 805
Production (tonnes)	52 762	108 052	276 023	242 772
Exportation (tonnes)	32 617	78 013	98 956	173 000

Source: FAOSTAT.

Les petits exploitants sont les principaux producteurs de coton, principalement dans la zone de la CMDT et en partie dans celle de l'Office de la Haute Vallée du Niger. Ces exploitants agricoles reçoivent un appui du Conseil de la CMDT pour la totalité du système basé sur le coton (cotonniers, céréales et légumineuses). Ils reçoivent des intrants (graines et engrais minéral) de la CMDT en coopération avec la Banque Nationale du Développement Agricole. La CMDT a le monopole de l'achat et de l'égrenage du coton-graine dans sa zone d'intervention. Les associations villageoises contrôlent la logistique et constituent l'unité du crédit pour la Banque Nationale du Développement Agricole. Le montant du crédit accordé dépend du niveau de la production de l'association villageoise, qui rembourse toujours le crédit par la production de coton. En plus de la gestion du crédit, l'association villageoise s'occupe de la commercialisation du coton-graine stocké dans les silos du village, avant son transport vers les usines CMDT. En outre, la CMDT est responsable des services publics (installation des routes rurales, des rizières, des constructions hydrauliques, promotion de l'instruction, etc.). Ce système a permis de développer non seulement le secteur du coton mais également le secteur des céréales. La zone du coton est également la principale zone de production de céréales et de bétail du Mali. La zone de la CMDT a produit 1 322 000 tonnes de céréales en 1999/2000 et a pu exporter un excédent de céréales de 534 000 tonnes (Soumaré, 2001). En raison des rendements relativement élevés du maïs et de l'intensification de cette culture, le bilan céréalier reste largement positif (400 kg par personne).

Cependant, le système malien a rencontré des difficultés, par exemple le boycott de la culture du cotonnier par des groupes de producteurs en 2000/01. Parmi les problèmes, Soumaré (2001) a noté:

- mauvaise gestion du crédit et des dettes des associations villageoises,
- désintégration des associations villageoises et émiettement de la cohésion sociale,
- rendements du coton en baisse,
- prix de la fibre de coton en baisse sur le marché mondial,
- mauvaise gestion de l'approvisionnement en intrants par la CMDT,
- manque d'un système d'audit, d'information et de contrôle interne, adapté à la situation actuelle de la CMDT,
- augmentation des besoins financiers de la CMDT et de la capacité du système local de banques à satisfaire tous les besoins.

Chapitre 3
Méthodes

Du fait que les limitations de données entre les niveaux d'échelle sont différentes, les procédures de calcul du bilan des éléments nutritifs diffèrent également. Ce chapitre explique la méthodologie pour le calcul du bilan des éléments nutritifs pour chaque niveau d'échelle, et fournit une vue d'ensemble des procédures et des données différentes pour chaque niveau.

NIVEAU GLOBAL

Cette étude a calculé le bilan des éléments nutritifs au niveau global sur la base d'un quadrillage. Comme l'utilisation de la terre est le principal responsable des flux et bilans des éléments nutritifs, elle a été à la base de la méthodologie. Un procédé existe pour créer une carte d'utilisation des terres, basée sur des aptitudes, et montrant la distribution la plus probable des cultures. Cette étude a combiné une carte avec quadrillage (taille de cellule de 1 kilomètre) avec d'autres données spatiales qui étaient nécessaires pour le calcul du bilan des éléments nutritifs. Exportée vers MS Access, la table d'attributs en résultant contenait toutes les données spatialement valides: densité de bétail, sols, précipitations, poussière de l'Harmattan, érosion-sédimentation et surfaces irriguées. Le programme MS Access a exécuté le calcul des bilans d'éléments nutritifs du sol et les résultats ont été exportés vers ArcView. Les résultats finaux doivent être agrégés si on doit les employer pour un affichage parce qu'un quadrillage de 1 km est trop détaillé pour le niveau global. Dans la mesure du possible, toutes les données d'intrants ont été ramenées à une moyenne pour les années 1997-99.

Carte d'utilisation de la terre

Il n'est pas possible de lier des données de couverture de la terre tirées des images satellites aux données de gestion parce que la couverture de la terre ne décrit pas la distribution des cultures. D'autre part, il n'est pas possible de lier des statistiques nationales, présentes dans la base de données FAOSTAT, aux données de sol et de climat parce que leur distribution spatiale est inconnue. La méthodologie décrite ci-dessous génère des cartes d'utilisation des terres pour n'importe quel pays africain sur la base des données disponibles. Les origines de la méthodologie proposée se situent dans l'évaluation qualitative traditionnelle des terres, où des qualités de terre sont associées à des conditions d'utilisation afin de trouver l'aptitude des terres pour les différents usages (FAO, 1976). La méthodologie pour cartographier l'utilisation de la terre comporte trois étapes principales:

Étape 1: Identifier les unités de terrain avec des conditions semblables de topographie, climat et sol.

Étape 2: Associer les propriétés des unités de terrain avec les exigences des cultures.

Étape 3: Distribuer les surfaces récoltées de FAOSTAT par rapport aux unités de terrain.

Étape 1

La première étape identifie des unités de terrain définies par la topographie, le sol et le climat. La topographie est décrite par un modèle numérique de terrain global de 30 secondes d'arc (30-arc second digital elevation model DEM) GTOPO30 (USGS, 1998). La carte des sols du monde au 1:5 000 000 de la FAO décrit les sols (FAO/UNESCO, 2003). Cependant, la légende de la carte des sols indique la classification des sols et ne fournit pas des évaluations quantitatives des propriétés de ces sols. Batjes (2002) a développé une base de données concernant l'inventaire mondial des potentiels d'émission des sols (= World inventory of soil emission potentials WISE) qui fournit des évaluations quantitatives des propriétés des sols pour toutes les classes de la carte mondiale des sols de la FAO. Pour le climat, cette étude a employé la base globale de données climatiques compilée par l'Institut international pour l'analyse de systèmes appliqués [= International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)], développée par Leemans et Cramer (1991). Les zones agroécologiques mondiales (FAO et IIASA, 2000) ont fourni des informations au sujet de la durée de la saison de culture en fonction des conditions atmosphériques. Cependant, une telle évaluation est seulement utile quand la zone est réellement cultivée ou pâturée. L'enquête géologique des États-Unis (United States Geological Survey USGS), l'université de Nébraska-Lincoln (États-Unis d'Amérique), et le Centre commun de recherche de la Commission européenne ont effectué une évaluation globale de la couverture des terres en utilisant deux images satellites consécutives (USGS *et al.*, 2000). Cette étude a employé la légende «région de couverture saisonnière des terres», regroupée en huit classes principales. Toutes les zones cultivées ont été regroupées comme terres de culture ou mélange terres de culture / végétation naturelle.

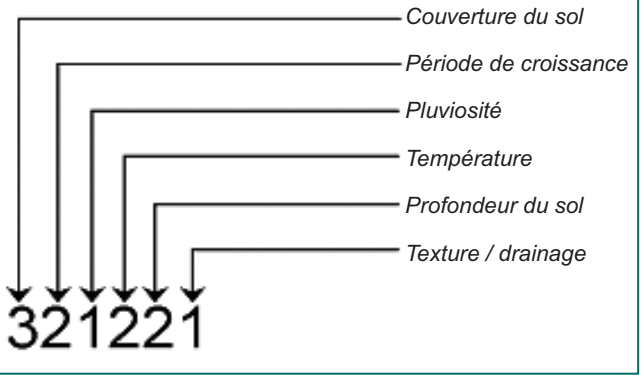
Les cartes ont été projetées en utilisant une projection azimutale à surface équivalente de Lambert avec un méridien central à 20° et à une latitude de référence de 5°. La prochaine étape a été de convertir les cartes avec un quadrillage de 1 km (en cas de besoin) avant de les reporter sur un quadrillage simple de 1 km. Ces cartes contenaient des données sur l'altitude, les sols, le climat, la saison de culture et la couverture des terres. En reliant les bases de données, il a été possible de créer un tableau avec les caractéristiques des terrains suivantes: couverture des terres, durée de la saison de culture, précipitations, température, profondeur de sol, texture, drainage et altitude.

Étape 2

La deuxième étape inclut le processus traditionnel de mise en concordance, selon le système qualitatif d'évaluation des terres de la FAO (FAO, 1976), qui met en rapport les qualités de terre avec les nécessités des cultures. Cependant, le manque

de données disponibles à ce niveau ne permettait pas une évaluation des qualités des terres. Par conséquent, les caractéristiques disponibles sur les terrains énumérées ci-dessus formaient la base de l'évaluation. La base de données ECOCROP (FAO, 1998a) de réponse des cultures à l'environnement décrit les conditions de culture, exprimées comme les caractéristiques des terrains. ECOCROP fournit des informations sur les conditions de culture pour 1 710 plantes, herbes et arbres différents. Pour de nombreuses conditions de culture, la base de données fournit des valeurs minimum et maximum aussi bien que les gammes optimales.

FIGURE 8
Code pour l'aptitude des terres



Un programme développé en Delphi associe les unités de terrain avec les 32 cultures principales et la jachère décrites dans la base de données FAOSTAT pour ce qui est des caractéristiques des terres et des conditions de culture. Le résultat de ce processus de mise en concordance est un code à six chiffres qui représente la classification des six caractéristiques principales du terrain de 1 (non approprié) à 3 (approprié) comme illustré dans la figure 8. Le code liste les caractéristiques de terrain dans l'ordre de fortement important (gauche) jusqu'à moins important (droite). Ainsi, il est possible de classer les codes d'aptitude et d'obtenir automatiquement une idée de la probabilité de trouver une forme spécifique d'utilisation de la terre sur l'unité de terrain en question.

Étape 3

L'étape finale de la procédure est de ventiler les cultures selon la classification d'aptitude. La base de données FAOSTAT fournit les surfaces réelles de chaque culture. Cette base de données contient des données nationales sur les surfaces récoltées pour les cultures les plus importantes. Un fichier d'ordre prédéfini des cultures détermine l'ordre dans lequel la culture est affectée en premier. Cette étude a rangé les cultures principalement sur la base de leur importance économique (tableau 8), c'est-à-dire qu'elle a affecté une importante culture de rente telle que le thé aux endroits les plus appropriés et une culture vivrière moins importante telle que le mil aux endroits moins adaptés. Chaque culture est répartie dans les secteurs ayant l'adaptabilité la plus élevée pour cette culture spécifique, à moins que d'autres cultures ne remplissent déjà cette zone. Ceci signifie que les plantes qui sont supérieures dans l'ordre des cultures sont affectées aux endroits les plus appropriés. La jachère est une exception, car elle ne dépend pas de l'adaptation à la zone mais du caractère d'un système particulier d'utilisation de la terre.

TABLEAU 8
Ordre des cultures pour la procédure d'élaboration de la carte d'utilisation des terres

Ghana	Kenya	Mali
Palmier à huile	Théier	Riz
Caféier	Caféier	Légumes
Cotonnier	Légumes	Autres Fruits
Hévéa	Cotonnier	Tabac
Tabac	Pomme de terre	Théier
Cocotier	Agrumes	Cotonnier
Agrumes	Autres Fruits	Canne à sucre
Légumes	Cocotier	Fibres
Autres Fruits	Canne à sucre	Patate douce
Canne à sucre	Riz	Blé
Riz	Tabac	Maïs
Bananier	Tournesol	Autres Céréales
Plantain	Sésame	Manioc
Cacaoyer	Plantain	Autres racines
Patate douce	Bananier	Mil
Autres racines	Autres racines	Sorgho
Manioc	Patate douce	Légumineuses
Mil	Blé	Arachide
Sorgho	Maïs	
Maïs	Orge	
Légumineuses	Manioc	
Arachide	Mil	
	Sorgho	
	Légumineuses	
	Arachide	

Par conséquent, la surface des jachères a été partagée et attribuée en proportion des cultures liées au système de jachère, qui sont principalement des céréales et des cultures de racines. Cette modification a fourni un modèle plus réaliste pour les surfaces en jachère, pour lequel la jachère est située dans le même secteur que les cultures de ce système particulier d'utilisation de la terre. Il n'a pas été possible de simuler directement les variations à courte distance des systèmes de culture ou des cultures associées. En effet, une seule utilisation de la terre peut être assignée à chaque cellule du quadrillage. Cependant, en agrégeant les résultats finaux dans un plus grand quadrillage, ces systèmes ont été indirectement pris en compte. Il a été possible de lier le tableau résultant de la simulation à la carte originale de quadrillage, et la carte d'utilisation de la terre a montré la distribution la plus probable des cultures, basée sur des aptitudes.

Paramètres du modèle

IN1: Engrais minéral

L'apport d'engrais minéral a été calculé par culture. Une fraction de la consommation totale d'engrais par élément nutritif a été attribuée à chaque culture. Les coefficients ont été basés sur des données des études sur les engrais utilisés par culture de l'Association Internationale des producteurs d'engrais (International Fertilizer Industry Association = IFA), du Centre international de développement des engrais (International Fertilizer Development Center = IFDC) et de la FAO (IFA/IFDC/FAO, 2000). Ces données n'étaient pas disponibles pour chaque pays. Pour le Ghana et le Mali, cette étude a employé des données des pays voisins dans la même zone agroécologique. La base de données FAOSTAT a fourni des chiffres pour la consommation totale d'engrais par pays. Le programme MS Access a ensuite calculé la quantité moyenne d'engrais par culture en kilogrammes par hectare.

Exemple de calcul:
Pour une cellule «maïs» du quadrillage au Kenya, les calculs étaient:

$IN1_N$ = 0,274 × 52 733 000 / 1 433 333 = 10,1 kg N/ha
$IN1_P$ = 0,255 × 30 638 000 / 1 433 333 = 5,5 kg P/ha
$IN1_K$ = 0,000 × 11 667 000 / 1 433 333 = 0 kg K/ha
0,274 = coefficient de la consommation totale de N appliqué au maïs
0,255 = coefficient de la consommation totale de P appliqué au maïs
0,000 = coefficient de la consommation totale de K appliqué au maïs
52 733 000 = consommation totale d'engrais N (kg)
30 638 000 = consommation totale d'engrais P (kg)
11 667 000 = consommation totale d'engrais K (kg)
1 433 333 = surface totale de maïs récoltée (ha).

IN2: Intrants organiques

Des cartes de densité (figure 9), préparées par la FAO et le groupe de recherche environnemental d'Oxford (environmental research group of Oxford Limited) étaient disponibles pour les principales classes d'animaux, c.-à-d. bovins, petits ruminants et volaille (tableau 9) (FAO, 2000). La carte de densité de volailles a été basée sur la population rurale d'Afrique subsaharienne (FAO, 2001b). Le nombre de volailles est sensé avoir la même distribution spatiale que la population rurale. Les densités d'animaux ont été multipliées par l'excrétion par animal et par an (tableau 10) et la teneur en éléments nutritifs du fumier (tableau 11). Ceci a donné la quantité totale d'éléments nutritifs produits par classe d'animaux. L'annexe 1 donne les valeurs de référence de plusieurs sources en matière d'éléments nutritifs.

La quantité totale d'éléments nutritifs produits par le bétail est connue, mais les pertes et leur distribution demeurent indéterminées. Selon Fernandez-Riviera *et al.* (1995) et Schlecht *et al.* (1995), les animaux produisent 43 pour cent de leur fumier la nuit dans leur étable, corral ou boma. Ainsi, 57 pour cent du fumier,

FIGURE 9
Carte de densité des animaux en Afrique

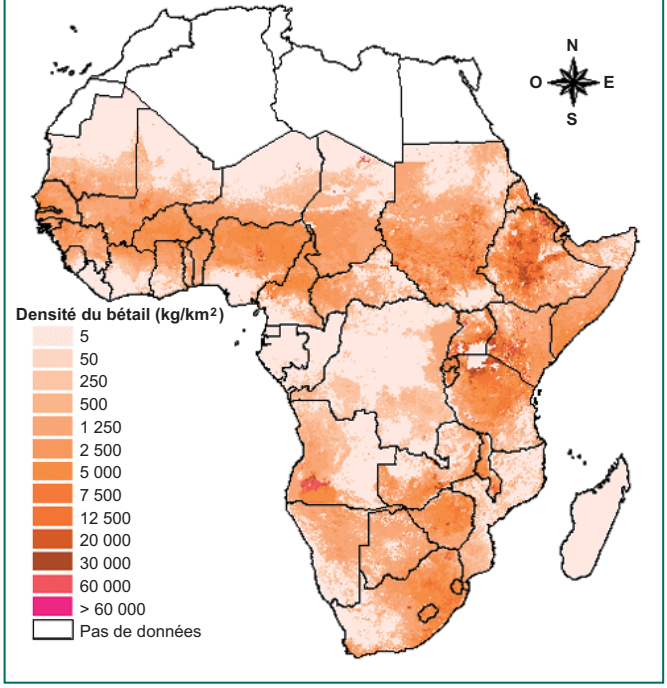


TABLEAU 9
Nombre d'animaux par pays

Animaux	Ghana	Kenya	Mali
Ânes	14 000	-	666 000
Chameaux	-	801 000	417 000
Bovins	1 274 000	13 269 000	6 122 000
Poulets	17 333 000	29 885 000	24 500 000
Chèvres	2 768 000	10 433 000	8 939 000
Chevaux	2 900	2 000	150 000
Cochons	346 000	302 000	65 000
Moutons	2 547 000	7 800 000	6 057 000

Source: FAOSTAT.

TABLEAU 10
Excrétion

	Par jour	Par an
	(kg matière fraîche par kg de poids d'animal)	
Bovins	0,0170	6,20
Volaille	0,0214	7,80
Mouton/Chèvre	0,0198	7,22

Source: tiré de Fernandez-Rivera *et al.*, 1995.

TABLEAU 11
Teneur en éléments nutritifs du fumier (poids frais)

	N	P	K
		(pour cent)	
Fumier de bovins	0,76	0,15	0,67
Fiente de poule	1,08	0,39	0,35
Fumier de mouton / chèvre	0,79	0,20	0,50

Source: tiré de sources citées en Annexe 1.

moins ce qui est perdu, demeurent au champ (cellule de quadrillage). Les autres 43 pour cent, pertes exclues, pourraient être replacés sur des cultures et des champs particuliers. D'ailleurs, une telle étude devrait prendre en compte le bétail dans les cellules de quadrillage sans culture. Et ce, parce que le bétail transporte des éléments nutritifs des pâturages jusqu'à l'étable et ensuite aux cultures. Par conséquent, les cartes de densité des animaux ont été agrégées dans un quadrillage de 30 km, qui représente la disponibilité moyenne de fumier dans une région. Cette quantité moyenne a été multipliée par un coefficient d'agrégation et un coefficient pour chaque culture. Le coefficient d'agrégation était dépendant du pays et proportionnel à la densité de population. Ce coefficient était 2 pour le Ghana et le Mali, et 1,5 pour le Kenya, parce que la densité de population y est plus forte. Le facteur culture détermine si une culture considérée reçoit du fumier (1), deux fois plus de fumier (2), ou aucun fumier (0). L'annexe 7 présente les estimations de ces coefficients pour chaque pays.

Pendant la pâture, le fumier est perdu sur le côté des routes et dans d'autres endroits que personne ne cultive. Ces pertes ont été estimées à 15 pour cent pour tous les pays. Les pertes pendant le stockage sont probablement plus fortes parce que le fumier a également d'autres utilisations, comme carburant ou matériau de construction des maisons. Les pertes se produisent également en raison du stockage lui-même, par lixiviation, dénitrification et volatilisation. Ce coefficient de perte dépend considérablement du type de gestion, et des coefficients différents ont été employés pour chaque pays. Les pertes estimées pour le Ghana, le Mali et le Kenya étaient de 40, 25 et 15 pour cent, respectivement. Ces pourcentages ont été basés sur la densité de population, le système d'élevage et l'importance relative du fumier comme fertilisant. Le fumier n'est pas collecté aussi intensivement au Ghana qu'au Kenya parce que le bétail n'est pas très important et la densité de

population est inférieure. Le Kenya a plus de systèmes de semi-pâturage et de non-pâturage, alors que le Ghana et le Mali ont principalement des systèmes de libre pâture. Les pertes dues à la lixiviation, à la dénitrification et à la volatilisation pour l'application calculée de fumier ont été chiffrées en OUT3 et OUT4.

Résumé de la procédure de calcul par cellule de quadrillage

IN2 = densité des animaux × coefficient fumier × coefficient de gestion (pendant la pâture) + densité agrégée des animaux × coefficient fumier × coefficient de gestion (application à partir des bomas, etc.).

Densité des animaux: en kilogrammes par kilomètre carré, dérivée de l'Atlas des animaux,

Coefficient fumier: coefficient d'excrétion et de contenu en éléments nutritifs (tableaux 10 et 11),

Coefficient de gestion: coefficient dépendant de la culture et du pays (tiré de la littérature, des experts), indique la période de pâture, la méthode d'application et les pertes.

Ce calcul a été exécuté pour chaque groupe d'animaux (bovins, petits ruminants et volailles) et ces valeurs ont été additionnées.

Exemple de calcul

Pour une cellule de quadrillage de maïs au Kenya et une densité de bovins de 100 kg/ha (environ 50/km^2) les calculs étaient:

$IN2_N$ = 100 × 6,20 × 0,0076 × 0,57 × 0,85 + 120 × 1,5 × 2 × 6,20 × 0,0076 × 0,43 × 0,80 = 8,1 kg N/ha

$IN2_P$ = 100 × 6,20 × 0,0015 × 0,57 × 0,85 + 120 × 1,5 × 2 × 6,20 × 0,0015 × 0,43 × 0,80 = 1,6 kg P/ha

$IN2_K$ = 100 × 6,20 × 0,0067 × 0,57 × 0,85 + 120 × 1,5 × 2 × 6,20 × 0,0067 × 0,43 × 0,80 = 7,1 kg K/ha

100 = densité de bovins (kg/ha)

6,20 = coefficient d'excrétion de fumier par les bovins en kilogrammes de fumier frais par kilogramme de poids corporel et par an

0,0076 = teneur en N du fumier frais de bovin

0,0015 = teneur en P du fumier frais de bovin

0,0067 = teneur en K du fumier frais de bovin

0,57 = coefficient pour le fumier produit pendant le pâturage

0,85 = coefficient corrigé par rapport aux pertes le long des routes, etc...

120 = densité agrégée de bétail (kg/ha), représente la quantité moyenne de fumier dans la région

1,5 = coefficient d'agrégation du pays

2 = coefficient pour la redistribution au maïs (relativement plus de fumier sur le maïs que sur d'autres cultures)

0,43 = coefficient pour le fumier produit dans les bomas, etc. (la nuit)

0,80 = coefficient corrigé pour les pertes de stockage, etc.

TABLEAU 12
Teneur en éléments nutritifs de l'eau de pluie

Lieu	N	P	K	Source
	(g/ha/mm pluie)			
Côte d'Ivoire	1,54	0,01	1,17	Stoorvogel *et al.*, 1997b
Monde tropical, moyenne	3,94	0,38	3,07	Bruijnzeel, 1990
Bujumbura, Burundi	10,90	1,10		Langenberg *et al.*, 2002
Kigoma, Tanzanie	3,80	0,40		Langenberg *et al.*, 2002
Mpulungu, Zambie	6,00	0,50		Langenberg *et al.*, 2002
Nigeria (moyenne)	4,28			Jones et Bromfield, 1970
Côte d'Ivoire	3,45		1,90	Baudet *et al.*, 1989
Addis-Abeba, Éthiopie	7,08			Richard, 1963
Korhogo, Côte d'Ivoire	9,04	0,96	3,04	Pieri, 1985
Saria, Burkina Faso	6,28	2,44	3,95	Pieri, 1985
Sénégal	0,60	1,56	4,90	Pieri, 1985
Yangambi, Congo	3,47			Meyer et Pampfer, 1959
Moyenne	4,88	0,63	2,63	
Déviation Standard	2,47	0,55	1,10	

IN3: Les retombées atmosphériques sèches et humides

L'entrée des élément nutritifs par retombée atmosphérique se décompose en deux parties: les retombées humides liées aux précipitations et les retombées sèches liées à la poussière de l'Harmattan. Des coefficients pour le contenu en éléments nutritifs ont été calculés, basés sur la littérature (tableaux 12 et 13). Une carte avec des valeurs de retombée de la poussière de l'Harmattan a été créée par interpolation, basée sur plusieurs sources documentaires (tableau 14) et des modèles d'écoulement de vent (Pye, 1987; McTainsh, 1980; McTainsh et Walker, 1982; Kalu, 1979). La figure 10 fournit des détails. La quantité de poussière a été dérivée de cette carte, tandis que la quantité de précipitations a été tirée de la carte des précipitations de l'IIASA (Leemans et Cramer, 1991).

Exemple de calcul

Pour une cellule de quadrillage au Ghana avec 1 200 millimètres de précipitations et 80 kilogrammes de poussière de l'Harmattan par hectare, les calculs étaient:

$IN3_N$ = 0,00488 × 1 200 + 0,0038 × 80 = 6,2 kg N/ha
$IN3_P$ = 0,00063 × 1 200 + 0,00079 × 80 = 0,8 kg P/ha
$IN3_K$ = 0,00263 × 1 200 + 0,0187 × 80 = 4,7 kg K/ha

0,00488 = teneur en azote de la pluie (kilogramme N/ha par millimètre de précipitations)
0,00063 = teneur en phosphore de la pluie (kilogramme P/ha par millimètre de précipitations)
0,00263 = teneur en potassium de la pluie (kilogramme K/ha par millimètre de précipitations)
1 200 = précipitations (millimètres)
0,0038 = teneur en azote de la poussière de l'Harmattan (kilogramme N par kg de poussière)

TABLEAU 13
Teneur en éléments nutritifs de la poussière apportée par l'Harmattan

Lieu	N	P	K	Source
		(g/kg poussière)		
Nigeria		0,7	17,0	Pye, 1987
Kano, Nigeria	3,7	1,1	24,6	Pye, 1987
Kano, Nigeria	3,4	1,0	23,9	Pye, 1987
Zaria, Nigeria	4,7	0,8	27,2	Pye, 1987
Zaria, Nigeria	3,3	0,8	24,6	Pye, 1987
Côte d'Ivoire		1,4	31,3	Stoorvogel *et al.*, 1997a
Sadore, Niger			1,2	Drees *et al.*, 1993
Chikal, Niger			0,7	Drees *et al.*, 1993
Nord Nigeria		0,1	1,5	Moberg *et al.*, 1991
Moyenne	3,8	0,8	18,7	
Déviation standard	0,6	0,4	12,4	

TABLEAU 14
Quantités de poussière apportées par l'Harmattan à différents endroits

Lieu	Poussière (kg/ha)	Source
Nyankpala, Ghana	185	Tiessen *et al.*, 1991
Kano, Nigeria	386	McTainsh et Walker, 1982
Maidugari, Nigeria	324	McTainsh et Walker, 1982
Zaria, Nigeria	106	McTainsh et Walker, 1982
Jos, Nigeria	21	McTainsh et Walker, 1982
Sokoto, Nigeria	15	McTainsh et Walker, 1982
Kano, Nigeria	1 000	McTainsh, 1980
Sadore, Niger	1 640	Drees *et al.*, 1993
Chikal, Niger	2 120	Drees *et al.*, 1993
Tai, Côte d'Ivoire	80	Stoorvogel *et al.*, 1997a

0,00079 = teneur en phosphore de la poussière de l'Harmattan (kilogramme P par kg de poussière)
0,0187 = teneur en potassium de la poussière de l'Harmattan (kilogramme K par kg de poussière)
80 = quantité de poussière apportée par l'Harmattan (kg/ha).

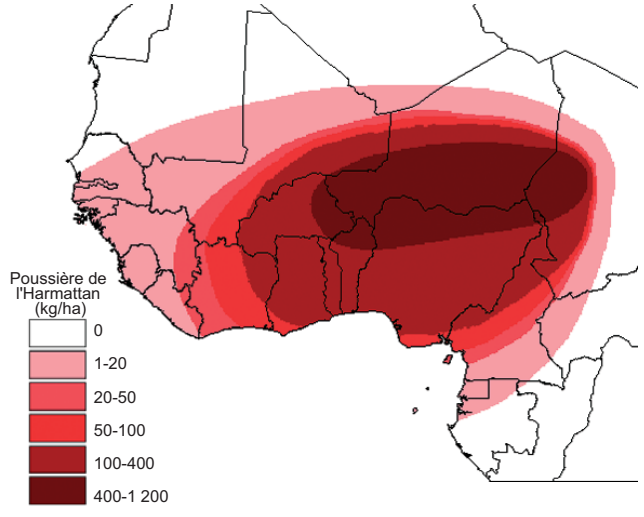
IN4: Fixation d'azote

La fixation biologique de l'azote a différentes composantes, par exemple la fixation symbiotique par les légumineuses, la fixation non symbiotique et les arbres fixateurs. Dans la littérature (Giller, 2001; Danso, 1992; Giller et Wilson, 1991; Hartemink, 2001), les pourcentages de l'accumulation totale de N dans la plante, représentés par la fixation symbiotique, étaient de:

- arachide: 65 pour cent;
- soja: 67 pour cent;
- légumineuses à gousses: 55 pour cent;
- canne à sucre: 17 pour cent.

Pour ce qui est du riz aquatique, les cyanobactéries fixent de l'azote, et cette étude a employé une valeur de 15 kilogrammes d'azote par hectare et par an.

FIGURE 10
Distribution de la poussière apportée par l'Harmattan en Afrique de l'Ouest



Cette valeur est légèrement inférieure à ce que la plupart des expériences indiquent, mais selon Giller (2001), l'effet des cyanobactéries est surestimé et ne se produit pas dans toutes les rizières. Cette fixation d'azote se produit seulement pour les riz aquatiques, mais en Afrique, plus de 50 pour cent des surfaces en riz sont cultivées en régime pluvial. Cependant, FAOSTAT ne différencie pas entre le riz irrigué et le riz pluvial. Par conséquent, la quantité d'azote fixée par les cyanobactéries a été multipliée par un coefficient pour le riz irrigué. Selon Nyanteng (1986) et l'IPCC (1997), le Ghana a 15 pour cent de riz irrigué, le Kenya 25 pour cent et le Mali 95 pour cent. Peu de littérature est disponible pour la fixation non symbiotique et les arbres fixateurs. Cet apport a été estimé sur la base de la quantité de précipitations en utilisant l'équation suivante (azote fixé exprimé en kilogramme N/ha et précipitations en mm/an):

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

Exemple de calcul

Pour une cellule de quadrillage «arachide» au Ghana avec des précipitations de 1 000 millimètres et un rendement de 1,2 tonne/ha, le calcul était:

$IN4_N$ = $0{,}65 \times (1{,}2\times37{,}2+1{,}2\times15{,}9) + (0{,}5 + 0{,}1\times\sqrt{1\,000}) = 45{,}0$ kg N/ha

0,65 = coefficient pour la part de la fixation symbiotique de N dans le total absorbé

1,2 = production (tonne/ha)

37,2 = teneur en azote du produit récolté (kilogramme N par tonne de produit récolté)

15,9 = teneur en azote des résidus de récolte (kilogramme N par tonne de produit récolté)

1 000 = précipitations annuelles (millimètres).

IN5: Sédimentation

Ce flux est composé de deux parties: apport des éléments nutritifs par l'eau d'irrigation; et apport de sédiment en raison de l'érosion. La FAO et l'université

de Kassel (Allemagne) ont développé une carte mondiale des surfaces irriguées (Döll et Siebert, 2000). L'apport d'éléments nutritifs a été calculé en combinant cette carte avec la quantité estimée d'eau d'irrigation, calée à 300 mm/ha/an, et 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) dérivée de Stoorvogel et Smaling (1990). L'apport par sédimentation a été calculé avec le modèle LAPSUS «LandscApe ProcesS modelling at mUltidimensions and Scales» (Schoorl *et al.*, 2000; Schoorl *et al.*, 2002) qui a également apporté un feedback entre IN5 et OUT5. Des détails sont donnés dans OUT5. La sortie du modèle était la sédimentation nette en mètres. Il était possible de convertir cette valeur en apport d'éléments nutritifs en la combinant avec la densité apparente et le contenu en éléments nutritifs.

Exemple de calcul
Pour une cellule de quadrillage «riz irrigué» au Mali, en l'absence de sédimentation, les calculs étaient:

$IN5_N$ = 300 × 3,3 × 0,01 = 9,9 kg N/ha
$IN5_P$ = 300 × 0,43 × 0,01 = 1,3 kg P/ha
$IN5_K$ = 300 × 1,4 × 0,01 = 4,2 kg K/ha
300 = quantité d'eau d'irrigation en millimètres (fixée)
3,3 = teneur en N de l'eau d'irrigation (mg N/litre)
0,43 = teneur en P de l'eau d'irrigation (mg P/litre)
1,4 = teneur en K de l'eau d'irrigation (mg K/litre)
0,01 = coefficient de conversion (1 millimètre = 10 litres/ha).

OUT1: Produits récoltés
Cette étude a calculé l'exportation d'éléments nutritifs par les produits récoltés en multipliant le rendement par la teneur en éléments nutritifs des récoltes (tableau 15). Les statistiques de la FAO (FAOSTAT) ont fourni des données sur la surface, la production et, par conséquent, le rendement pour chaque pays.

Exemple de calcul
Pour une cellule de quadrillage «maïs» au Kenya, les calculs étaient:

$OUT1_N$ = 1,5 × 16,8 = 25,2 kg N/ha
$OUT1_P$ = 1,5 × 4,1 = 6,2 kg P/ha
$OUT1_K$ = 1,5 × 4,8 = 7,2 kg K/ha
1,5 = rendement (tonne/ha)
16,8 = teneur en N du maïs (kilogramme N par tonne de produit récolté)
4,1 = teneur en P de maïs (kilogramme P par tonne de produit récolté)
4,8 = teneur en K de maïs (kilogramme K par tonne de produit récolté).

OUT2: Résidus de récolte
Cette étude a calculé l'exportation des éléments nutritifs par les résidus de récolte en multipliant la production de résidus de culture par la teneur en éléments nutritifs des résidus de récolte (tableau 15) et un coefficient d'exportation. Ce

TABLEAU 15
Teneur en éléments nutritifs des produits récoltés, des résidus de récolte et coefficients d'exportation des résidus de récolte

Cultures	Produits récoltés			Résidus de récolte			Coefficient d'exportation		
	N	P	K	N	P	K	Ghana	Kenya	Mali
	(kg/tonne)			(kg/tonne)			(pour cent)		
Agrumes	1,8	0,2	2,3	0,6	0,2	4,4	10	15	-
Arachide	37,2	6,0	8,2	15,9	2,4	14,9	30	60	80
Bananier	1,2	0,3	4,5	1,6	0,3	11,9	10	20	-
Blé	22,3	4,3	5,8	4,3	1,8	26,7	-	60	40
Cacaoyer	40,0	8,5	19,3	19,9	4,7	33,3	10	-	-
Caféier	35,0	2,6	16,8	4,3	3,8	9,3	10	15	-
Canne à sucre	0,6	0,2	1,2	0,3	0,3	0,3	10	20	20
Céréales, Autres	16,7	4,4	4,8	10,9	2,3	38,6	-	-	60
Cocotier	61,0	7,2	9,8	27,0	5,7	25,3	10	20	-
Coton	18,7	9,7	9,0	13,9	6	29,8	60	60	60
Fibres	5,0	0,4	6,0	2,1	0,7	9,0	-	-	10
Fruits, Autres	2,0	0,2	2,0	1,8	0,2	4,9	40	50	50
Hévéa	6,9	1,2	4,6	1,0	0,2	4,0	10	-	-
Légumes	9,0	0,9	2,6	3,2	1,4	7,8	40	60	80
Légumineuses	20	3,4	11,1	10,4	1	13,1	30	70	80
Maïs	16,8	4,1	4,8	9,7	1,9	21,4	30	75	80
Manioc	4,2	0,5	4,3	4,6	0,9	1,4	40	20	20
Mil	19,2	6,0	5,4	20,4	4	59,8	30	70	50
Oléagineux, Autres	2,6	0,5	4,4	0,3	0,6	5,4	-	-	-
Orge	15,5	2,8	6,0	7,0	1	21,0	-	35	-
Palmier à huile	2,9	0,7	4,1	3,7	0,6	3,3	10	-	-
Patate douce	4,8	0,8	7,3	2,1	1,2	3,3	30	20	30
Plantain	0,7	0,1	3,4	1,2	0,3	6,4	10	20	-
Pomme de terre	4,4	1,3	6,9	2,3	0,7	4,5	-	20	-
Racines, Autres	4,6	0,3	2,9	1,9	0,5	3,1	25	20	25
Riz	11,6	3,4	3,4	11,3	2,3	35,8	15	20	35
Sésame	30,0	6,1	6,8	15	5,4	21,1	-	75	-
Soja	62,1	10,9	20,0	17,6	3,0	14,4	-	-	-
Sorgho	14,5	5,5	3,8	10,8	4,6	29,2	30	70	50
Tabac	56,0	8,2	72,7	0,1	0	0,2	10	20	10
Théier	35,0	3,8	13,4	0,1	0	0	-	15	10
Tournesol	24,0	3,5	5,5	23,0	3,2	41,3	-	40	-

Source: Stoorvogel et Smaling, 1990.

dernier est spécifique de la culture et du pays, et il est basé sur une littérature peu abondante et la connaissance des experts.

Le coefficient d'exportation reflète le type de gestion. Les coefficients d'exportation pour le Kenya central, avec une densité de population élevée et beaucoup d'animaux, sont plus élevés que ceux pour le sud du Ghana, où le bétail est relativement peu important. Une forme spéciale d'exportation des résidus est le brûlis. Il est difficile de déterminer l'ampleur du brûlis à ce niveau global. Aussi, le brûlis a été considéré seulement pour le coton, parce que les exploitants agricoles brûlent normalement ces résidus afin d'empêcher la multiplication des parasites et des maladies. Tout l'azote est perdu par volatilisation et la moitié environ de la potasse est perdue directement par lixiviation.

Exemple de calcul
Pour une cellule de quadrillage «maïs» au Kenya, les calculs étaient:

$OUT2_N$ = 1,5 × 9,7 × 0,75 = 10,9 kg N/ha
$OUT2_P$ = 1,5 × 1,9 × 0,75 = 2,1 kg N/ha
$OUT2_K$ = 1,5 × 21,4 × 0,75 = 24,1 kg N/ha
1,5 = quantité de résidus de récolte (tonnes/ha)
9,7 = teneur en N des résidus de maïs (kilogramme de N par tonne de résidus récoltés)
1,9 = teneur en P des résidus de maïs (kilogramme de N par tonne de résidus récoltés)
21,4 = teneur en K des résidus de maïs (kilogramme de N par tonne de résidus récoltés)
0,75 = coefficient d'exportation des résidus de récolte pour le maïs.

OUT3: Lixiviation
La lixiviation peut être une sortie importante pour N et K. De Willigen (2000) a développé un modèle de régression pour estimer la quantité d'azote lixivié. Ce modèle est basé sur une recherche extensive dans la littérature et est valide pour une large gamme de sols et de climats. Un nouveau modèle de régression pour la lixiviation de la potasse a été développé, basé sur la même base de données:

N lixivié = (0,0463 + 0,0037 × (P / (C × L))) × (F + D × NOM - U)
K lixivié = -6,87 + 0,0117 × P + 0,173 × F - 0,265 × CEC
P = Précipitations annuelles (millimètres)
C = Argile (pour cent)
L = Épaisseur de la couche (m) = profondeur d'enracinement, dérivée de FAO (1998b), voir annexe 3
F = Azote minéral et organique des engrais (kilogramme de N/ha)
D = Taux de décomposition (= 1,6 pour cent par an)
NOM = Quantité de N dans la matière organique du sol (kilogramme N/ha)
U = Absorption par la culture (kilogramme N/ha)
CEC = Capacité d'échange cationique (cmol/kg).

Le modèle de régression de la lixiviation de N est basé sur 43 mesures différentes, prenant en compte 67 pour cent de la variance (De Willigen, 2000). L'équation a été légèrement modifiée pour les cultures pérennes en multipliant la quantité d'azote dans la matière organique du sol par 0,5 afin d'éviter la surestimation de la lixiviation d'azote, parce que les pérennes peuvent absorber de l'azote tout au long de l'année. Le modèle de régression de la lixiviation de K est basé sur 33 expériences représentatives et a une valeur R^2 de 0,45 (annexe 2 pour les références).

Exemple de calcul
Pour une cellule de quadrillage «maïs» sur un Luvisol ferrique au Kenya, avec un rendement de 1,8 tonne/ha et une application d'engrais de 50 kilogrammes N/ha et de 30 kilogrammes K/ha, les calculs étaient:

$OUT3_N$ = (0,0463 + 0,0037 × (1 500/(21,3 × 0,9))) × (50 + 0,016 × 2 418 - 1,8 × (16,8 + 9,7)) = 13,8 kg N/ha
$OUT3_K$ = -6,87 + 0,0117 × 1 500 + 0,173 × 30 - 0,265 × 6,24 = 14,2 kg K/ha
1 500 = Précipitations (millimètres)
21,3 = Teneur en argile (pour cent)
0,9 = Epaisseur de la couche / profondeur d'enracinement du maïs (m)
50 = Application d'engrais azoté (kilogramme N/ha)
0,016 = Taux de décomposition (par an)
2 418 = Quantité d'azote dans les 20 premiers centimètres de sol (kilogramme N/ha)
1,8 = Rendement du maïs (tonne/ha)
16,8 = Teneur en N du produit récolté (kilogramme de N par tonne de produit récolté)
9,7 = Teneur en N des résidus de récolte (kilogramme de N par tonne de produit récolté)
30 = Application d'engrais potassique (kilogramme K/ha)
6,24 = CEC (cmol/kg).

OUT4: Pertes gazeuses

Deux processus causent la majeure partie des émissions gazeuses d'azote: dénitrification et volatilisation. La dénitrification a lieu dans des conditions anaérobies. Il n'est pas nécessaire qu'un sol soit entièrement saturé en eau pour que la dénitrification se produise. Un sol humide perd des nitrates par des processus microbiens dans des films et des microsites humides. On s'attend à ce que les pertes par dénitrification soient plus importantes dans des climats humides, avec des sols fortement fertilisés et argileux. La volatilisation d'ammoniac joue un rôle principalement dans les sols alcalins, mais de tels sols ne sont pas très communs au niveau global en Afrique subsaharienne. Par conséquent, la volatilisation et la dénitrification dans les sols ne reçoivent pas un traitement séparé. La volatilisation est également liée directement à la quantité d'engrais minéral et organique.

Cette étude a développé un modèle de régression pour estimer les pertes gazeuses d'azote. L'équation est composée de deux parties: un modèle de régression pour les pertes de N_2O et de NOx par dénitrification, et un coefficient de perte direct pour la volatilisation de NH_3. Les équations ont été basées sur des données de littérature pour les environnements tropicaux (annexe 4). Elles ont été dérivées d'une plus grande base de données, compilées pour une étude récente qui a estimé les émissions gazeuses globales de NH_3, NO et N_2O à partir des terres agricoles (IFA/FAO, 2001). Le modèle de régression de N_2O a été basé sur les données de 80 expériences et a une valeur R^2 de 0,45. Le modèle de régression de NOx a été basé sur 36 mesures différentes et a une valeur R^2 de 0,91. Pour les émissions de NH_3, 73 mesures étaient disponibles. De tout l'engrais azoté appliqué, 11,3 pour cent sont perdus, avec un écart type de 6,2 pour cent.

OUT4 = (0,025 + 0,000855 × P + 0,01725 × F + 0,117 × O) + 0,113 × F
P = précipitations annuelles (millimètre)

F = azote de l'engrais minéral et organique (kilogramme N/ha)
O = teneur en carbone organique (pour cent).

Exemple de calcul
Pour une cellule de quadrillage «maïs» avec un Luvisol ferrique au Kenya, avec une application de 50 kilogrammes N/ha sous forme d'engrais organique et minéral, le calcul était:

$OUT4_N$ = (0,025 + 0,000855 × 1 500 + 0,01725 × 50 + 0,117 × 0,63) + (0,113 × 50) = 7,8 kg N/ha
1 500 = précipitations (millimètre)
0,63 = teneur en carbone organique (pour cent)
50 = application d'engrais azoté minéral et organique (kilogramme N/ha)

OUT5: Érosion
Il est difficile d'estimer l'érosion, pourtant elle peut être importante. Pour estimer l'érosion, cette étude a utilisé le modèle LAPSUS. Ce modèle simule la quantité d'érosion et de sédimentation à l'échelle du paysage. Cette méthode a plusieurs avantages: elle produit des données quantitatives, elle prend en compte l'érosion à l'échelle du paysage et elle tient compte de la sédimentation. Ceci est donc préférable par rapport aux évaluations tirées de la littérature, parce que ces dernières se fondent principalement sur les expériences au niveau de la parcelle, qui ne sont pas représentatives du niveau général.

Les concepts de base
Cette étude a employé une approche modélisatrice basée sur les travaux de Kirkby (1971, 1978, 1986) et Foster et Meyer (1972, 1975). Ils supposent que l'énergie potentielle de l'eau coulant à la surface du paysage est la force d'entraînement pour le transport des sédiments. Une autre hypothèse importante est l'utilisation de l'équation de continuité pour le mouvement des sédiments. Ceci implique que la différence entre l'entrée et la sortie des sédiments est égale à l'augmentation nette du stockage. Prenant en compte un état quasi-régulier, Foster et Meyer (1972, 1975) formulaient la continuité du transport des sédiments dans le sens de la pente comme étant:

$$-\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{C - S}{h}$$

où z est l'altitude (m), t représente le temps, C est la capacité de transport de sédiment (m^2/temps) et S est le taux de transport de sédiment (m^2/temps). Le terme h représente le taux de décollement dans des conditions d'érosion, alors qu'il représente le taux de dépôt dans des conditions de sédimentation. Afin de trouver le changement d'altitude δz par rapport au pas de temps δt, il est nécessaire de calculer les changements du taux de transport des sédiments δS. Ces changements du taux de transport sont contrôlés par la capacité de transport C, pour laquelle un excès de capacité sera comblé par le décollement du sédiment (par

exemple érosion, surface plus basse), et un déficit de capacité abaissera la quantité de sédiment transporté (par exemple sédimentation, surface plus élevée). Selon Foster et Meyer (1972, 1975), après intégration, en supposant que la capacité de transport et la capacité de décollement ou de dépôt demeurent constantes pour un élément fini, le calcul du taux de sédiment transporté est:

$$S = C + (S_0 - C) \cdot e^{-dx/h}$$

où le taux S (m^2/temps) de transport sur une longueur *dx* d'un élément fini est calculé en fonction de la capacité C de transport (m^2/temps) et du taux *h* de décollement ou de sédimentation comparé à la quantité de sédiment déjà en cours de transport S_0 (m^2/temps). S est exprimé comme un volume de sol par largeur d'unité de quadrillage et par an. Pour convertir en taux d'érosion ou de dépôt en unité de masse par surface et par an, S est divisé par la longueur du quadrillage (*dx*) et multiplié par la densité apparente du sol. Le terme *h* (m) se rapporte à la capacité de transport divisée par la capacité de décollement (m/temps) (*C/D*) ou à la capacité de transport proportionnellement à la capacité de sédimentation/dépôt (-m/temps) (*C/T*). L'exécution de cette équation aura besoin d'expressions pour la capacité de transport *C*, la capacité de décollement *D* et la capacité de dépôt *T*. Ces capacités sont calculées comme des fonctions de la décharge et de la pente, ce qui donne:

$$C = \alpha \cdot Q^m \cdot \Lambda^n$$

où *C* est calculé en fonction de la décharge *Q* (m^2/temps) et de la tangente de la pente ($\delta z/\delta x$) Λ [-], *m* et *n* sont des constantes (la variable fictive α corrige les unités). En assumant, entre autres, que la capacité de décollement et de dépôt sont proportionnelles à un certain cisaillement et que le coefficient de résistance / traînée est constant, les équations sont:

$$D = K_{es} \cdot Q \cdot \Lambda$$

$$T = P_{es} \cdot Q \cdot \Lambda$$

où *Kes* est un coefficient de surface (par mètre) indiquant l'érodibilité de la surface et *Pes* un coefficient semblable indiquant les caractéristiques de sédimentation (par mètre). Les conditions d'érosion pour *D* ou les conditions de sédimentation pour *T* auront comme conséquence des signes opposés pour le changement de *S* et en conséquence aussi de δz.

Structure du modèle et écoulement du flux

LAPSUS est basé sur une structure de quadrillage avec des cellules carrées de taille égale. Chaque cellule présente une partie généralisée du paysage qui peut comporter plusieurs caractéristiques uniques (altitude, sols, etc.). Le modèle est structuré d'une manière optimale pour la simulation des caractéristiques bidimensionnelles et tridimensionnelles dans la dimension temps. De cette façon,

le modèle considère l'estimation des capacités comme un processus bidimensionnel vu que seuls la force de gravité et l'écoulement de l'eau vers le bas sont considérés dans l'élément fini. Cependant, pour l'estimation et le cheminement des flux d'eau et de sédiment entrant et sortant d'une cellule, le modèle évalue les résultats des cellules du quadrillage qui l'entourent dans la totalité du paysage tridimensionnel. La méthode des éléments finis implique une longueur variable mais une largeur d'unité à différentes résolutions pour chaque élément.

Processus de modélisation du paysage

Le modèle LAPSUS évalue les taux de transport de sédiment en calculant la capacité de transport vers le bas de pente de l'eau passant d'une cellule de quadrillage à l'autre en fonction de la décharge et du gradient de la pente. Un excédent de capacité de transport de l'eau est comblé par le décollement du sédiment, qui dépend de l'érodibilité de la surface, K_{es} (par mètre). Ce décollement de sédiment provoque l'abaissement de la surface d'érosion. Cependant, quand le taux de sédiment transporté excède la capacité locale, par exemple en raison de gradients inférieurs, une fonction de sédimentation déposera l'excédent de sédiment transporté, entraînant de ce fait une surface ou une sédimentation plus élevée. Le cheminement de l'écoulement de surface et les calculs de modèles en résultant sont faits avec un algorithme d'écoulement multiple afin de permettre une meilleure représentation des propriétés divergentes de la topographie convexe (figure 11). Le cadre de modélisation a subi des tests élaborés pour les effets du changement des algorithmes d'écoulement, de la résolution spatiale et de la résolution temporelle. Seul le scénario de base de LAPSUS a été validé par des observations de terrain en Espagne méridionale, mais il explicite des formes d'érosion et de sédimentation qui s'accordent étroitement avec de vrais modèles d'érosion et de sédimentation du monde à la même résolution spatiale.

Les paramètres principaux d'entrée pour le modèle LAPSUS basé sur un quadrillage sont les potentiels topographiques (gradients de pente) d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et l'évaluation de l'excédent de précipitations qui va entraîner un ruissellement de surface. On fait l'hypothèse qu'une des conditions uniformes pour tous les paramètres est impliquée dans chaque cellule du quadrillage. Le modèle évaluera tous les

FIGURE 11
Représentation schématique d'un algorithme à flux multiple

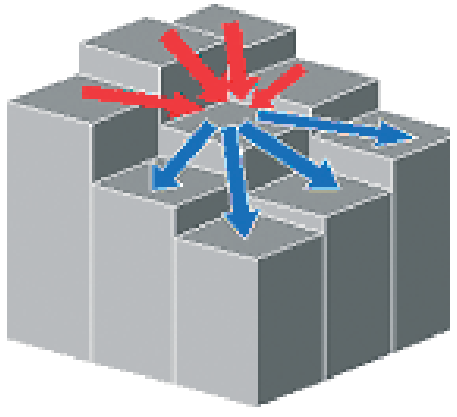
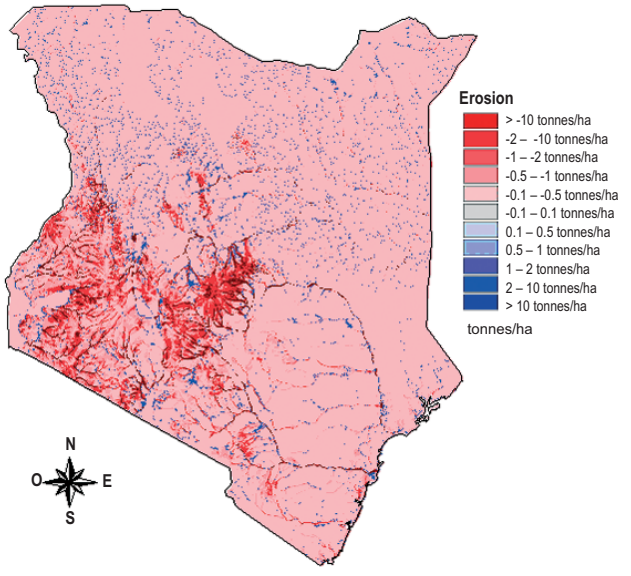


FIGURE 12
Carte d'érosion-sédimentation du Kenya



paramètres considérés sur une base annuelle pour un certain temps d'exécution total. D'autres paramètres d'entrée sont la profondeur du sol, pour estimer la quantité d'infiltration, et l'érodibilité (K_{es}). Il est possible de déterminer ces paramètres à partir d'une carte géologique ou pédologique. De plus, une carte d'utilisation de la terre ou de couverture de la terre peut servir d'entrée pour l'évaluation de la quantité de ruissellement. Le modèle LAPSUS peut ainsi fonctionner pour un nombre choisi d'années et de paramètres d'entrée.

La présente étude a employé les données suivantes d'entrée:

- Modèle numérique de terrain avec une résolution de 1 kilomètre (USGS, 1998)
- carte de couverture de la terre (USGS *et al.*, 2000)
- carte de précipitations (Leemans et Cramer, 1991) et données pour le Kenya (Corbett et White, 1998)
- érodibilité du sol (coefficient K), tirée de la carte des sols du monde (FAO/UNESCO, 2003)
- profondeur de sol, tirée de la carte des sols du monde (FAO/UNESCO, 2003). L'annexe 5 décrit le procédé exact et les coefficients utilisés pour le modèle.

Les produits du modèle sont une carte d'érosion-sédimentation nette avec pour unité le mètre, convertible en tonne par hectare (figure 12). Il est possible de calculer la perte ou le gain d'éléments nutritifs en multipliant ces chiffres par le contenu en éléments nutritifs du sol et un coefficient d'enrichissement. Le coefficient d'enrichissement reflète le fait que les particules les plus fines et les plus fertiles du sol seront détachées au début de la phase d'érosion. En se basant sur la littérature, l'étude a employé les coefficients suivants d'enrichissement: 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 tirer de la carte des sols la teneur en éléments nutritifs du sol. Du fait de l'érosion, la profondeur de la zone d'enracinement augmente, ce qui signifie que de nouveaux éléments nutritifs arrivent à la portée des racines de la plante. Cette étude a posé l'hypothèse que 25 pour cent du P et du K perdus à cause de l'érosion avaient été gagnés par ce déplacement de la zone d'enracinement.

Exemple de calcul

Pour une cellule de quadrillage sur un Luvisol ferrique au Kenya, avec 1 millimètre d'érosion, les calculs étaient:

$OUT5_N$ = 0,001 × 1,55 × 0,078 × 2,3 × 100 000 = 27,8 kg N/ha
$OUT5_P$ = 0,001 × 1,55 × 0,0068 × 2,8 × 0,75 × 100 000 = 2,2 kg P/ha
$OUT5_K$ = 0,001 × 1,55 × 0,016 × 3,2 × 0,75 × 100 000 = 6,0 kg K/ha
0,001 = érosion (m)
1,55 = densité apparente (kg/dm^3)
0,078 = teneur du sol en N (pour cent)
0,0068 = teneur du sol en P (pour cent)
0,016 = teneur du sol en K (pour cent)
2,3 = coefficient d'enrichissement pour N
2,8 = coefficient d'enrichissement pour P
3,2 = coefficient d'enrichissement pour K
0,75 = coefficient d'augmentation de la zone d'enracinement
100 000 = coefficient de conversion vers les kg/ha.

Jachère

Les statistiques de la FAO ne donnent pas de détails sur les surfaces en jachère. Cependant, il a été possible de les calculer indirectement en soustrayant le total des surfaces récoltées du total des terres arables (tableau 16). IN1 et OUT1 ne sont pas adaptés à la jachère. IN2 et OUT2 sont adaptés à la jachère car ils comprennent le pâturage des animaux et l'excrétion de ces mêmes animaux. On ne sait pas si IN2 devrait être plus grand ou plus petit qu'OUT2. Seule une partie du fumier est laissée sur le champ (environ 57 pour cent seulement), mais, par ailleurs, une grande partie de l'alimentation des animaux provient de sources autres que les résidus de récolte et du pâturage des bords de route. Par conséquent, pour les terres en jachère, la quantité d'éléments nutritifs apportés par le fumier (IN2) a été considérée comme étant égale à la quantité perdue du fait du pâturage (OUT2). Tous les autres flux d'éléments nutritifs peuvent être traités de la même manière que pour les autres cultures.

NIVEAU INTERMÉDIAIRE

Procédure générale

Le calcul du bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire a utilisé des données tabulaires. L'approche a impliqué l'établissement de relations entre l'utilisation de la terre et les sols afin de compenser le manque de données spatiales. Par exemple, au Ghana, les exploitants agricoles cultivent les cacaoyers principalement sur des terrains au sommet et dans la pente, où se

TABLEAU 16
Surfaces en jachère pour le Ghana, le Kenya et le Mali

	Terres arables	Surfaces récoltées	Jachère
	(ha)		
Ghana	5 300 000	4 471 445	828 555
Kenya	4 520 000	3 604 198	915 802
Mali	4 650 000	3 247 573	1 402 427

Source: données tirées de FAOSTAT.

trouvent des Acrisols orthiques. Comme il est plus facile d'adapter des données tabulaires plutôt que des données spatiales, il est possible d'inclure des exceptions. En particulier, par rapport au niveau global, cela permet une amélioration de la description des données de gestion de la culture, qui sont très importantes au niveau intermédiaire. Il n'était pas possible de créer une carte d'utilisation de la terre semi-détaillée ou de reconnaissance pour les secteurs de niveau intermédiaire étudiés. Les données de niveau intermédiaire n'étaient pas disponibles pour une procédure basée sur une carte et les données de niveau global n'auraient fourni aucune valeur supplémentaire et n'étaient pas suffisamment représentatives. Au niveau intermédiaire, un quadrillage de 1 km est trop grossier pour représenter des différences physiographiques avec une précision suffisante. Si des données avec une résolution plus élevée étaient disponibles, il serait nécessaire de développer une nouvelle procédure pour la création d'une carte d'utilisation de la terre. C'est parce qu'une approche basée sur l'aptitude des sols n'est pas appropriée au niveau intermédiaire, là où les coefficients socio-économiques sont bien plus importants. Les photographies aériennes et les images satellitaires avec un rapide contrôle sur le terrain peuvent également fournir une base pour la création d'une carte d'utilisation de la terre. Cependant, ces images n'étaient pas disponibles pour les secteurs étudiés. Les données disponibles au niveau des trois pays étaient très différentes, ce qui interdit une approche générique au niveau intermédiaire.

IN1 Engrais minéral

Les sources de données sur les engrais minéraux étaient des enquêtes au niveau des exploitations agricoles, les doses d'engrais recommandées et les données du niveau global, selon la disponibilité des données dans chaque secteur étudié. Les doses d'engrais recommandées sont généralement beaucoup plus fortes que les doses réelles appliquées parce qu'une partie seulement des exploitants agricoles souhaitent ou peuvent se permettre d'appliquer ces quantités. Par conséquent, afin d'empêcher les surestimations, les doses d'engrais ont été multipliées par un coefficient représentant le rapport entre la surface récoltée au niveau intermédiaire et la surface récoltée au niveau national.

IN2 Engrais organique

La quantité de fumier disponible a été calculée à partir du nombre d'animaux domestiques dans le secteur étudié, en utilisant des coefficients d'excrétion, de teneur en éléments nutritifs et de perte d'éléments nutritifs. Les quantités appliquées par culture ont été déduites des enquêtes ou des évaluations d'exploitations agricoles. Des valeurs locales de teneurs en éléments nutritifs ont été employées quand elles étaient disponibles.

IN3 Retombées atmosphériques

Les retombées atmosphériques ont été dérivées du niveau global. Des données de précipitations de stations météorologiques locales ont été employées ou, quand elles n'étaient pas disponibles, elles ont été déduites du niveau global.

IN4 Fixation de l'azote
La fixation d'azote a été traitée d'une manière semblable à celle utilisée pour le niveau global. Là où elles étaient disponibles, les données spécifiques liées à la fixation de N devraient être incluses, par exemple pour les systèmes d'agroforesterie avec des arbres fixateurs d'azote.

IN5 Sédimentation
L'irrigation n'a pas été prise en compte pour les trois études de cas. La sédimentation a été estimée pour des cultures de vallée fluviale, par exemple le riz. Le modèle LAPSUS n'a pas été employé au niveau intermédiaire en raison du manque de données spatiales.

OUT1 Produits agricoles
Les données des productions agricoles ont été multipliées par les teneurs en éléments nutritifs des cultures. Là où ils étaient disponibles, des coefficients locaux de teneurs en éléments nutritifs ont été employés parce que ceux-ci peuvent différer de manière significative des valeurs continentales moyennes utilisées au niveau global.

OUT2 Résidus de récolte
Les coefficients d'exportation des résidus de récolte ont été tirés des enquêtes sur les exploitations agricoles ou estimés par les experts locaux. Ces coefficients ont été multipliés par la production et les teneurs en éléments nutritifs des résidus de récolte.

OUT3 Lixiviation
Les calculs de la lixiviation de N et de K ont utilisé les modèles de régression de niveau global.

OUT4 Pertes gazeuses
L'évaluation des pertes gazeuses d'azote a utilisé le modèle de régression de niveau global.

OUT5 Érosion
Des évaluations de l'érosion ont été faites pour chaque culture. Ces évaluations ont tenu compte des différences régionales dans la topographie et les sols et ont été basées sur la littérature et la connaissance des experts. Le modèle LAPSUS n'a pas été employé en raison du manque de données spatiales.

Ghana
Pour le Ghana, les bilans d'éléments nutritifs ont été calculés pour deux districts: Nkawie et Wassa Amenfi. La disponibilité des données au Ghana était faible parce qu'il n'y a eu aucune étude sur la fertilité des sols et la gestion des éléments nutritifs dans la zone du cacao. Par conséquent, une quantité significative des données a été

dérivée du niveau global. Une carte des sols (échelle: 1 250 000) (Soil Research Institute, 1999) était disponible pour les deux districts, mais les caractéristiques chimiques représentatives des sols étaient inconnues. Par conséquent, les propriétés des sols ont été dérivées de la base de données WISE (Batjes, 2002). Les stations météorologiques locales ont été la source des données de précipitations, ramenées à une moyenne pour 1997-99. Les bilans d'éléments nutritifs ont considéré les cultures suivantes: cacaoyer, maïs, manioc, plantain, taro, igname, riz, légumes et palmier à huile. La surface des cultures annuelles et les données de niveau global ont fourni les bases pour estimer la surface en jachère: 14 600 ha (13 pour cent) dans le district de Nkawie, et 7 300 ha (2,7 pour cent) dans le district de Wassa Amenfi. L'annexe 9 énumère toutes les données de base.

IN1 Aucune donnée disponible pour les engrais. Les données du niveau global ont été employées. Seules des données pour le cacaoyer sont disponibles.

IN2 Nombre d'animaux connu. La quantité de fumier disponible a été calculée. Un coefficient de perte de 50 pour cent a été estimé parce qu'aucune gestion active du fumier n'a lieu. Fumier disponible apporté aux cultures selon le tableau 17.

IN3 Les données du niveau global ont été employées.

IN4 Aucune fixation symbiotique ou non-symbiotique d'azote selon l'équation du niveau global.

IN5 Irrigation non prise en compte. Pour le riz, taux estimé de sédimentation: 1 mm/an

OUT1 Données de production disponibles.

OUT2 Les coefficients d'exportation des résidus de récolte du niveau global ont été employés.

OUT3 Calculé selon les modèles de régression.

OUT4 Calculé selon le modèle de régression.

OUT5 Utilisation des valeurs estimées par culture (tableau 18).

TABLEAU 17
Surfaces récoltées et fumier pour chaque culture dans deux districts, Ghana

Culture	District de Nkawie		District de Wassa Amenfi	
	Surface (ha)	pour cent du fumier	Surface (ha)	pour cent du fumier
Cacaoyer	48 493	0	240 961	0
Igname	1 175	2	1 500	5
Jachère	14 600	0	7 300	0
Légumes	-	-	250	20
Maïs	11 455	50	5 650	40
Manioc	11 838	15	7 700	15
Palmier à huile	-	-	900	0
Plantain	11 725	15	5 000	10
Riz	1 462	0	2 112	0
Taro	9 514	18	3 000	10

TABLEAU 18
Érosion estimée par culture pour un système à base de cacao

Culture	Érosion (tonnes/ha)	Explication
Cacaoyer	1	Sur les pentes, mais litière épaisse et système racinaire stable
Igname	7	Dans des champs nouveaux et fort risque d'érosion pendant la récolte
Jachère	0,5	Couverture permanente du sol
Légumes	10	Près des maisons, plus de ruissellement, plus de sols nus
Maïs	5	Planté dans les champs nouveaux et nus
Manioc	5	Reste 2 ans, mais fort risque d'érosion pendant la culture
Palmier à huile	1	Zones relativement plates et système racinaire stable
Plantain	3	Système racinaire relativement stable
Riz	0	Dans les vallées et donc sans érosion, mais avec sédimentation
Taro	7	Dans des champs nouveaux et fort risque d'érosion pendant la récolte

Kenya

Beaucoup de données étaient disponibles pour le Kenya parce que de nombreuses études de fertilité des sols et de gestion des éléments nutritifs y ont été réalisées. Cependant, toutes les données n'ont pu être utilisées parce qu'elles étaient très dispersées ou basées sur quelques exploitations agricoles seulement. Le secteur étudié comportait la zone «théier – caféier - laiterie» du district d'Embu, définie principalement par la zone agroécologique ZAE 2 de l'étude VARINUTS (SC-DLO *et al.*, 2000). Le secteur est couvert principalement de Nitisols. Une carte des sols du district d'Embu (ministère de l'Agriculture, 1987) était disponible, mais un seul type de sol était différencié dans le secteur d'étude. Cette étude a utilisé les propriétés des sols déterminées dans l'étude VARINUTS (tableau 19). L'annexe 9 énumère toutes les données de base.

Les calculs de bilans d'éléments nutritifs ont pris en compte les cultures suivantes dans le secteur étudié: théier, caféier, maïs, haricot, herbe à éléphant (*Pennisetum*), sorgho, niébé, manioc, pomme de terre, patate douce et maranta. Aucune donnée n'était disponible pour l'herbe à éléphant , aussi l'étude a utilisé une estimation de rendement de 35 tonnes/ha (Van den Bosch *et al.*, 1998b), et, pour la surface cultivée, une valeur de 3 pour cent de toute la surface cultivée a été prise (Abdullahi *et al.*, 1986). Pour les divisions de Manyatta et de Nembure, la surface en jachère a été basée sur la surface non cultivée, qui est de 24 km^2. De cette surface, 75 pour cent ont été estimés comme étant en jachère, la surface restante étant considérée comme bâtiments et forêt. La surface de jachère était donc de 1 800 ha, ce qui représente 8 pour cent de toute la surface

TABLEAU 19
Propriétés des sols pour les zones agroécologiques les plus hautes du district d'Embu

Propriétés des sols	ZAE1	ZAE2	ZAE3
pH	4,4	4,5	4,5
N total (pour cent)	0,75	0,64	0,44
C total (pour cent)	3,3	2,5	2,3
P total (ppm)	2 211	2 095	1 898
P Olsen (ppm)	3,5	2,9	2,3
K ech. (cmol(+)/kg)	0,46	1,14	1,05
Densité apparente (kg/dm^3)	0,80	1,20	1,55
Argile (pour cent)	35	60	70
CEC (cmol(+)/kg)	28,7	19,4	19,4

Source: Stoorvogel *et al.*, 2000.

TABLEAU 20
Doses d'application d'engrais minéral, district d'Embu

Culture	N	P	K	Référence
		(kg/ha)		
Caféier	59	13	0	Staverman, 2003
Haricot	6	6	0	Staverman, 2003
Herbe à éléphant (*Pennisetum*)	33	6	0	Staverman, 2003
Jachère	0	0	0	Pas d'engrais
Maïs	18	8	2	Staverman, 2003
Manioc	0	0	0	Pas d'engrais
Maranta	0	0	0	Pas d'engrais
Niébé	0	40	0	Dose recommandée (200 kg/ha, TSP)*
Patate douce	17	7	14	Dose recommandée (100 kg/ha, 17:17:17)*
Pomme de terre	45	50	0	Min. de l'Agriculture et GTZ, 1998 (250 kg/ha, DAP)
Sorgho	10	4	0	Dose recommandée (50 kg/ha, 20:20:0)*
Théier	34	3	6	Dose recommandée (135 kg/ha, 25:5:5)*

* Doses d'engrais recommandées par le Ministère de l'Agriculture, 1997.

cultivée. La production estimée de la terre en jachère était de 10 tonnes/ha, dont 5 pour cent sont exportés pour le fourrage et le bois de chauffage.

IN1 Application d'engrais minéral basée sur la thèse de Staverman (2003) pour plusieurs cultures (les données ont été tirées de 50 visites d'exploitations agricoles dans la zone agroécologique ZAE3 du district d'Embu). Doses recommandées d'engrais minéraux utilisées pour les autres cultures (tableau 20).

IN2 Nombre d'animaux connu; quantité de fumier disponible calculée. Coefficient de perte: 25 pour cent. Coefficients d'application basés sur Staverman (2003).

IN3 Retombées atmosphériques sèches non significatives; données de niveau global utilisées pour les retombées humides.

IN4 Fixation symbiotique d'azote pour les haricots, les niébés et le soja et non-symbiotique selon l'équation de niveau global.

IN5 Irrigation non prise en compte; la sédimentation se produit seulement dans les zones d'inondation.

OUT1 Données de production disponibles; teneurs locales en éléments nutritifs de Van den Bosch *et al.* (1998a) utilisées.

OUT2 Évaluations des coefficients locaux utilisés pour l'exportation de résidus de récolte.

OUT3 Calculé selon les modèles de régression.

OUT4 Calculé selon le modèle de régression.

OUT5 Valeurs estimées par culture, basées sur des données de l'étude LEINUTS (De Jager *et al.*, 2001) dans le district de Nyeri, qui est dans la même zone agroécologique (tableau 21).

Mali

Pour le Mali, le calcul du bilan des éléments nutritifs a pris en compte la région de Koutiala de la CMDT au Mali-Sud. La CMDT a effectué beaucoup d'enquêtes

TABLEAU 21
Érosion estimée par culture, district d'Embu

Cultures	Érosion	LEINUTS	Explication
	(tonnes/ha)		
Caféier	5	3.6	Selon l'étude LEINUTS
Haricot	7	7.2	Selon l'étude LEINUTS
Herbe à éléphant (Pennisetum)	4	4.6	Selon l'étude LEINUTS
Jachère	0.5	0.6	Selon l'étude LEINUTS
Maïs	8	8.1	Selon l'étude LEINUTS
Manioc	10	-	Forte érosion pendant la culture
Maranta	0	-	Cultivé dans les vallées, équilibre attendu
Niébé	7	-	Similaire au haricot
Patate douce	5	4.3	Selon l'étude LEINUTS
Pomme de terre	3	2.6	Selon l'étude LEINUTS
Sorgho	8	-	Similaire au maïs
Théier	1	0.8	Selon l'étude LEINUTS

TABLEAU 22
Propriétés des sols de bas de pentes dans la Région de Koutiala

Matériau d'origine	Grès	Schiste	Dolérite	Moyenne
Argile (pour cent)	5,4	6,0	6,9	6,1
MO (pour cent)	0,6	0,5	0,7	0,6
CEC (cmol(+)/kg)	3,0	4,3	6,0	4,4
pH	5,5	5,8	5,6	5,6
N total (pour cent)	0,03	0,04	0,03	0,03
P total (ppm)	93	139	97	110
P ass. (ppm)	5,7	3,0	3,5	4,1
K ech. (cmol (+)/kg)	0,03	0,03	0,03	0,03

Source: Bitchibaly *et al.*, 1995.

d'exploitations agricoles dans ce secteur, ce qui a produit de nombreuses données concernant la gestion des éléments nutritifs. Par conséquent, beaucoup de données de haute qualité pour des flux importants, tels que les engrais minéraux, les engrais organiques et l'exportation des résidus de récolte, étaient disponibles pour le secteur étudié. Cependant, les données spatiales étant pratiquement indisponibles, seule une carte morphologique de la région, dessinée à la main, était utilisable. Les secteurs cultivés se trouvent sur les bas de pentes avec trois types différents de sol, selon le matériau d'origine (Sissoko, 1999). L'étude a employé des valeurs moyennes pour les propriétés de ces sols (tableau 22). Les principales cultures dans le secteur étudié sont: cotonnier, maïs, sorgho, mil, riz, arachide et niébé. Ces cultures couvrent 97 pour cent de tout le secteur cultivé. La recherche dans deux villages représentatifs a fourni une base pour l'évaluation de la surface en jachère (Kanté, 2001). Dans ces villages, 48 pour cent du secteur cultivé étaient en jachère. L'évaluation résultant de ce chiffre pour la totalité de la région de Koutiala est une surface de jachère de 227 200 ha. L'annexe 9 énumère toutes les données de base.

IN1 Engrais appliqués: urée (46 pour cent N), complexe coton (14:9,6:10) et complexe céréale (15:6,5:12,5). La quantité d'engrais appliqué par culture et le pourcentage des champs fertilisés étaient connus (CMDT/SE, 1998, 1999 et 2000).

TABLEAU 23
Utilisation des résidus de récolte dans la région de Koutiala

Cultures	Fourrage	Litière	Enfouissement	Pâturage	Brûlis	Autres	Total exporté*
				(pour cent)			
Arachide	65	10	9	15	0	1	81
Cotonnier	0	38	0	0	61	1	1
Maïs	44	11	9	36	0	0	80
Mil	2	11	3	48	34	2	52
Niébé	83	0	0	15	0	2	100
Sorgho	2	20	1	48	28	1	51

* Exportations totales calculées comme étant la somme des fourrages, pâturage et autres.
Source: Camara, 1996.

TABLEAU 24
Taux d'érosion estimés pour la région de Koutiala

Cultures	Érosion (tonnes/ha)	Explication
Arachide	10	Érosion supérieure à la moyenne, du fait du mode de récolte
Cotonnier	10	Érosion supérieure à la moyenne, du fait du brûlis après la récolte
Jachère	0,5	Peu d'érosion, du fait d'une couverture permanente du sol
Maïs	5	Érosion inférieure à la moyenne, vu que le chaume est laissé au champ
Mil	5	Moins d'érosion, vu que le chaume est laissé au champ
Niébé	7	Érosion moyenne
Riz	0	Pas d'érosion, car le riz est cultivé dans les fonds plats des vallées
Sorgho	5	Érosion inférieure à la moyenne, vu que le chaume est laissé au champ

IN2 Données sur l'application d'engrais organique disponibles (SEP, 1997, 1998 et 1999).

IN3 Retombées atmosphériques sèches et précipitations dérivées du niveau global.

IN4 Fixation symbiotique d'azote pour l'arachide (65 pour cent) et le niébé (55 pour cent) et non-symbiotique selon l'équation de niveau global.

IN5 Irrigation non prise en compte; sédimentation estimée à 1 mm/an pour le riz (cultivé dans les vallées).

OUT1 Données de production disponibles; coefficients locaux de teneur en éléments nutritifs de Kanté (2001) utilisés.

OUT2 Étude entreprise des résidus de récolte (tableau 23); coefficients locaux de teneur en éléments nutritifs de Kanté (2001) utilisés.

OUT3 Calculé selon les modèles de régression.

OUT4 Calculé selon le modèle de régression.

OUT5 Érosion estimée pour chaque culture selon la littérature disponible. Érosion moyenne sur la terre cultivée (tableau 24): 7 tonnes/ha (Bah, 1992; Vlot et Traoré, 1995).

NIVEAU DÉTAILLÉ

Les méthodes appliquées pour déterminer au niveau détaillé les bilans d'éléments nutritifs diffèrent considérablement de celles appliquées au niveau global et au

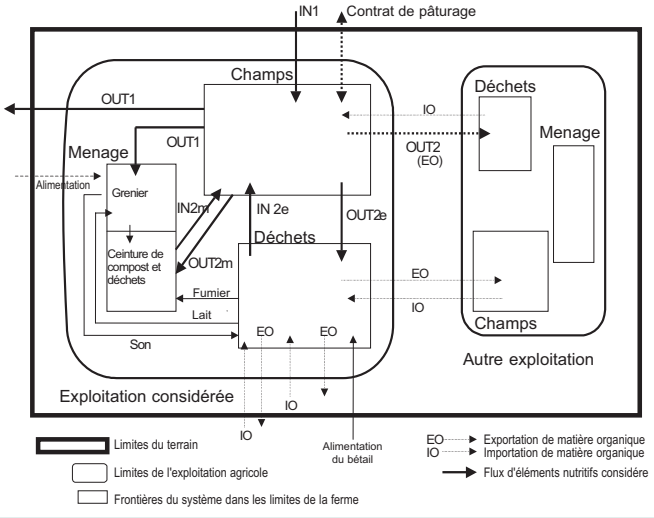
niveau intermédiaire car elles sont généralement basées sur des inventaires sur place et des suivis de contrôle qui fournissent des données de première main. Cependant, elles utilisent toutes des modèles de régression et autres variables de remplacement pour estimer les flux difficiles, tels que la lixiviation et les pertes gazeuses. Un outil de recherches, récemment développé, connu sous le nom de NUTMON (www.nutmon.org) permet le co-calcul des effets d'INM et combine le calcul des flux et des bilans d'éléments nutritifs avec la performance économique de l'exploitation agricole selon différents scénarios de gestion des éléments nutritifs (Vlaming *et al.*, 2001). La méthodologie fait la différence entre les flux d'éléments nutritifs «faciles à mesurer» et ceux «difficiles à mesurer». Les flux «faciles à mesurer» IN1, IN2, OUT1 et OUT2 peuvent être quantifiés à partir des données d'enquête sur les exploitations agricoles et s'exprimer en unités monétaires et en travail (figure 1). Ces flux représentent un bilan partiel des éléments nutritifs, souvent déterminés dans des études au niveau des exploitations agricoles. Les flux «difficiles à mesurer» IN3, IN4, IN5, OUT3, OUT4 et OUT5, sont normalement estimés à l'aide de fonctions de transfert. Les fonctions de transfert sont des relations simples qui expliquent les variables «difficiles à mesurer» en fonction de paramètres faciles à se procurer. Il est impossible ou difficile d'exprimer ces flux d'éléments nutritifs en termes monétaires (Van den Bosch *et al.*, 1998a). Le projet VARINUTS financé par l'Union Européenne au Kenya a aidé à construire la boîte à outils ci-dessus, du fait que les données ont été rassemblées et les flux d'éléments nutritifs ont été calculés selon les procédures de NUTMON. Quinze exploitations agricoles ont été suivies sur une base mensuelle pendant une période de deux ans. D'autres informations sur l'approche de NUTMON sont disponibles dans De Jager *et al.* (1998) et Van den Bosch *et al.* (1998 a et b).

Une étude au Sud Mali (Kanté, 2001) a comparé deux villages ayant des systèmes de production semblables mais avec différentes pressions sur la terre en raison d'une densité de population plus importante et d'un rapport plus élevé de la terre cultivée sur la terre totale. Cette étude est basée en partie sur les données d'une enquête de la CMDT sur les exploitations agricoles. Les flux d'éléments nutritifs ont été calculés selon Stoorvogel et Smaling (1990), avec des modèles de régression légèrement modifiés pour OUT3 et OUT4. Les «flux difficiles» ont été estimés, alors que les flux d'éléments nutritifs du bilan partiel étaient mesurés sur la base d'un diagramme général de la façon dont les exploitants agricoles perçoivent les flux d'éléments nutritifs (figure 13). Les bilans partiels (IN1, IN2, OUT1 et OUT2) ont été calculés par culture, par exploitation agricole, par classe de richesse et par village. En conclusion, le bilan complet avec tous les apports et les sorties a été calculé. Les pertes d'éléments nutritifs résultant des latrines profondes (OUT6) ont été représentées au niveau détaillé, parce que toute l'exploitation agricole a été considérée comme faisant partie du système.

VUE D'ENSEMBLE

Le tableau 25 présente un résumé des procédures de calcul et des données pour chaque niveau de cette étude.

FIGURE 13
Flux d'éléments nutritifs au sein d'une exploitation au Mali-Sud



Source: Kanté (2001).

CALCUL DES STOCKS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL

Les flux et les bilans d'éléments nutritifs ne sont pas très signicatifs sans connaissance des stocks d'éléments nutritifs. C'est pourquoi le taux de diminution de la fertilité du sol n'est pas simplement une unité «par hectare et par an», mais également un rapport indiquant le pourcentage de changement de tous les apports nutritifs. Les chapitres 4 et 5 prennent en compte cet aspect plus en détail. En outre, les stocks d'éléments nutritifs jouent un rôle comme données d'entrée pour le calcul des flux d'éléments nutritifs, la sédimentation, la lixiviation et l'érosion, et à un degré moindre pour les pertes gazeuses. La base de données WISE, développée par le centre international de référence et d'information sur les sols (International Soil Reference and Information Centre = ISRIC) (Batjes, 2002) a été la source de toutes les données concernant le sol pour le niveau global et d'une partie des données pour le niveau intermédiaire. La base de données WISE se compose d'un ensemble de données mondiales homogénéisées sur 4 382 profils de sol géo référencés, classifiées selon la légende originale FAO-UNESCO (1974) et la légende révisée (1988). Concernant l'Afrique, cette base de données contient les profils différents de 1 799 sols, décrivant 81 unités de sol. Or la carte des sols du monde de la FAO distingue 95 unités différentes de sol pour l'Afrique, indépendamment des classes: «eau», «sel», «désert», «rochers» et «pas de données». Des unités de sol similaires ont fourni la base pour l'évaluation des propriétés pour les 14 unités de sol restantes. En fait, la plupart des unités de sol absentes de la base de données WISE étaient les principaux groupements généraux de sols, par exemple Luvisols et Xerosols, parce que tous les profils ont été classifiés au niveau de l'unité de sol, par exemple Luvisol gleyique ou Xerosol luvique.

Cette étude a compilé les propriétés suivantes pour chaque unité de sol: argile, pH, carbone organique, N total, K échangeable, CEC, P disponible et densité apparente. La profondeur et l'érodibilité du sol ne sont pas des paramètres de la base de données WISE. Ceux-ci ont été estimés pour chaque unité de sol parce qu'ils sont nécessaires pour le modèle d'érosion-sédimentation. La base de données WISE décrit les propriétés de sol par horizon, mais cette étude a employé une seule

TABLEAU 25
Comparaison des données et procédures pour le calcul des flux d'éléments nutritifs pour chaque niveau

Flux	Niveau global	Niveau intermédiaire	Niveau détaillé
IN1	Données d'utilisation des engrais par culture (IFA/IFDC/FAO, 2000) et consommation totale tirée de FAOSTAT	Données régionales d'utilisation des engrais et coefficients par culture (les mêmes que pour le niveau global, si aucune autre valeur n'est disponible)	Données locales d'utilisation des engrais par culture
IN2	Conversion des cartes continentales de densité du cheptel (FAO, 2000) en apport d'éléments nutritifs en multipliant par la teneur en éléments nutritifs, la production de fumier et le coefficient de perte	Nombre d'animaux (données régionales) avec coefficients de conversion pour les apports d'éléments nutritifs et la gestion du fumier	Données locales sur les animaux, coefficients de conversion pour les apports d'éléments nutritifs (là où ils ne sont pas encore déterminés) et données sur la gestion du fumier (ou dose de fumier appliquée quand cela est disponible)
IN3	Lié aux précipitations (Leemans et Cramer, 1991) et retombées sèches tirées de la carte de la poussière de l'Harmattan	Valeur fixée tirée du niveau global (ou directement quand de la littérature est disponible)	Valeur fixée tirée du niveau global (ou directement quand de la littérature est disponible)
IN4	Pourcentage de la production des cultures de légumineuses et lié aux précipitations (Leemans et Cramer, 1991)	Pourcentage de la production des cultures de légumineuses et valeur fixée	Pourcentage de la production des cultures de légumineuses et valeur fixée
IN5	Surfaces irriguées reçoivent 300 mm d'irrigation. Sédimentation calculée avec le modèle LAPSUS (Schoorl *et al.*, 2002)	Estimations des surfaces irriguées et des zones de sédimentation	Quantités d'eau d'irrigation et sédimentation mesurée ou estimée
OUT1	Surfaces récoltées et rendements par pays (FAOSTAT) multipliés par la teneur en éléments nutritifs	Données régionales sur les surfaces récoltées et rendements (ou productions) multipliés par la teneur en éléments nutritifs	Données locales de production multipliées par la teneur en éléments nutritifs
OUT2	Coefficient teneur en éléments nutritifs et coefficient exportation par les résidus de récolte pour chaque culture et par pays	Coefficient teneur en éléments nutritifs et coefficient exportation par les résidus de récolte pour chaque culture	Coefficient teneur en éléments nutritifs et coefficient exportation par les résidus de récolte (gestion)
OUT3	Modèles de régression pour N développés par De Willigen (2000) et pour K dans cette étude	Modèles de régression pour N développés par De Willigen (2000) et pour K dans cette étude	Modèles de régression pour N développés par De Willigen (2000) et pour K dans cette étude
OUT4	Modèle de régression basé sur des données d'une étude sur les émissions globales d'azote par les terres agricoles (IFA/FAO, 2001)	Modèle de régression basé sur les données d'une étude sur les émissions globales d'azote par les terres agricoles (IFA/FAO, 2001)	Modèle de régression basé sur les données d'une étude sur les émissions globales d'azote par les terres agricoles (IFA/FAO, 2001)
OUT5	Carte des données quantitatives d'érosion-sédimentation, compilée en utilisant le modèle LAPSUS (Schoorl *et al.*, 2002)	Valeurs estimées par culture, basées sur la littérature et le niveau global	Valeurs d'érosion mesurées ou estimées et teneur en éléments nutritifs du sol
OUT6	Non approprié	Non approprié	Estimé, basé sur le nombre de 'consommateurs' et la quantité de produits agricoles auto-consommés

valeur par unité de sol. Les données des horizons ont été converties en une valeur par profil de sol. Cette étude a pris en compte seulement la partie supérieure du profil parce que c'est la partie la plus importante pour l'agriculture et parce que la plupart des éléments nutritifs sont stockés dans l'horizon de surface. Les horizons supérieurs devraient inclure au moins les 30 premiers centimètres du profil et la frontière inférieure ne devrait pas être plus profonde que 60 centimètres. Ceci a été

fait pour empêcher qu'un seul horizon supérieur mince ou un subhorizon profond soit pris en considération. Ces horizons choisis ont fourni la base pour calculer une valeur moyenne (voir annexe 6 pour les valeurs).

Afin de calculer la perte de P et de K par érosion, il était nécessaire de reprendre les données pour obtenir des valeurs en pourcentage de la masse totale de sol. Pour le K échangeable, c'est relativement facile, en utilisant la densité apparente et la masse atomique de 39,1. Pour le phosphore, aucune relation directe n'existe entre la quantité totale de P et la quantité disponible de P, selon la base de données WISE. Différentes méthodes analytiques existent pour déterminer la quantité de P disponible et chacune a une relation différente avec la quantité totale de P dans le sol. Selon la base de données WISE, 1 135 des 1 799 profils ont été analysés pour le P disponible. La méthode Olsen a été employée pour 943 profils (83 pour cent de toutes les analyses). La méthode Bray a été employée pour 6 pour cent et la méthode Truog pour 3 pour cent de toutes les analyses. Selon Landon (1991), les valeurs de P Olsen correspondent à P total comme suit: > 15 est élevé, 5-15 est moyen et < 5 est faible pour P Olsen, tandis que pour P total, les teneurs > 1 000 mg/kg sont fortes, entre 200 et 1 000 mg/kg, elles sont moyennes et < 200 mg/kg, elles sont basses. Cette classification approximative est actuellement la meilleure disponible. Une équation de régression basée sur la méthode Olsen a été développée pour relier le P disponible et le P total. Elle a été modifiée légèrement pour tenir compte de l'influence des méthodes Bray et Truog:

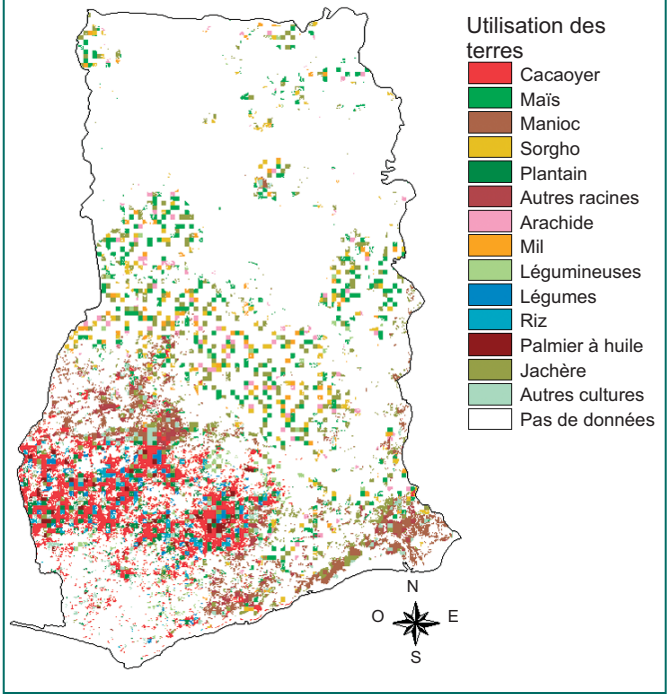
$$P_{total} = 13 \times P_{disponible}^{1.5}$$

Chapitre 4
Résultats

NIVEAU GLOBAL
Ghana

La figure 14 montre la carte simulée d'utilisation de la terre au Ghana. Cacaoyer et palmier à huile sont les cultures dominantes dans le sud-ouest plus humide du pays, alors que maïs, mil, sorgho et arachide le sont dans le nord plus sec. Le manioc se trouve entre ces deux zones et dans le sud-est. Basé sur cette carte d'utilisation de la terre, le tableau 26 présente les bilans d'éléments nutritifs totaux et par culture pour le Ghana. Les différences entre cultures sont importantes, par exemple le cocotier et le manioc épuisent fortement la fertilité du sol, tandis que la jachère et l'arachide ont un bilan d'éléments nutritifs presque neutre.

FIGURE 14
Carte simulée d'utilisation des terres du Ghana

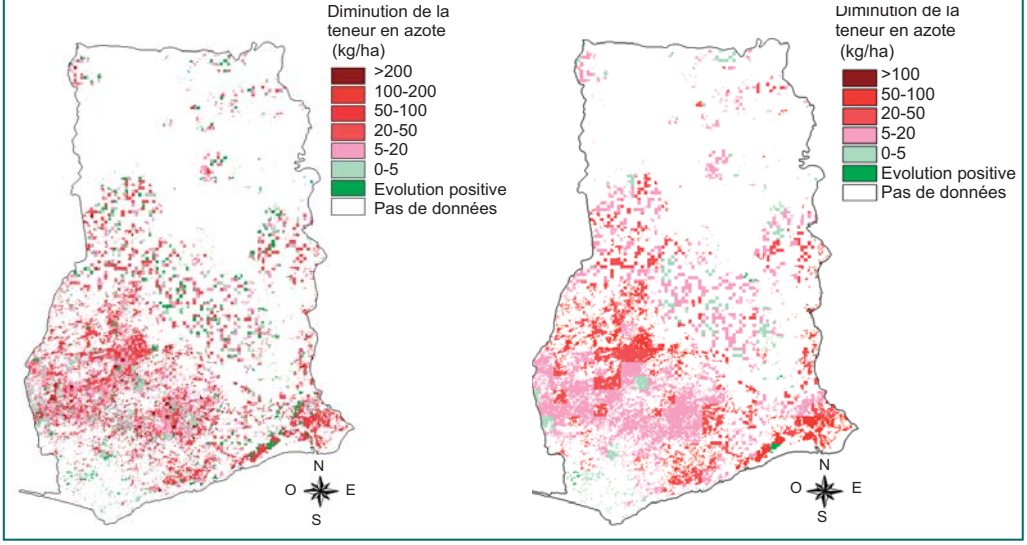


La carte de gauche sur la figure 15 montre le bilan de l'azote à la résolution d'origine de 1 km. La jachère et l'arachide ont des bilans d'éléments nutritifs presque neutres, tandis que le cocotier et le manioc ont des bilans fortement déficitaires (tableau 26). La représentation des bilans sur cette carte est très morcelée et l'incertitude sur les résultats est très forte en raison des incertitudes de la carte d'utilisation de la terre. Par conséquent, la carte a été agrégée sur un quadrillage de 20 km (en employant la valeur médiane) afin d'obtenir une image de tout le système de production, au lieu des différentes cultures (carte de droite sur la figure 15). Les taux les plus élevés d'épuisement des éléments nutritifs sont dans les régions sud-est et centre ouest du Ghana, qui correspondent à la zone du manioc.

TABLEAU 26
Bilan des éléments nutritifs par culture et total, Ghana

Cultures	Surface	N	P	K
	(ha)		(kg/ha)	
Agrumes	41 867	-14,0	-1,5	-23,3
Arachide	185 077	-1,7	-5,1	-12,7
Bananier	4 733	-41,2	-3,1	-11,6
Cacaoyer	1 246 500	-15,8	-2,5	-12,9
Caféier	19 800	-10,0	-1,0	-15,8
Canne à sucre	5 600	-2,6	-2,2	-31,1
Cocotier	53 100	-368,3	-44,9	-77,6
Cotonnier	50 387	-24,0	-10,2	-26,6
Fruits, autres	17 133	-27,0	-2,9	-36,2
Hévéa	15 710	2,5	0,3	-11,8
Jachère	828 555	-9,0	0,6	-1,3
Légumes	131 688	-51,0	-7,0	-34,8
Légumineuses	153 333	-16,9	0,1	-5,4
Maïs	681 707	-21,2	-4,8	-15,2
Manioc	619 760	-67,7	-9,0	-57,4
Mil	178 910	-21,6	-5,2	-21,7
Palmier à huile	106 667	-33,7	-6,4	-46,3
Patate douce	60 200	-5,7	-0,5	-11,9
Plantain	241 233	-10,6	-0,5	-37,7
Racines, autres	213 787	-32,1	-1,7	-33,1
Riz	117 800	-35,3	-5,8	-19,0
Sorgho	322 553	-17,4	-6,0	-13,2
Tabac	3 900	-28,3	-4,2	-38,9
Total	5 300 000	-27,0	-4,0	-21,0

FIGURE 15
Bilan de l'azote au Ghana, par cellule d'1-km (gauche) et par cellule agrégée de 20 km (droite)



Kenya

La carte simulée d'utilisation de la terre au Kenya (figure 16) montre un modèle complexe d'utilisation des terrains. L'agriculture est concentrée dans les zones d'altitude centrales et occidentales. Les théiers et les caféiers se trouvent principalement dans l'ouest du pays et le maïs principalement dans la partie centre - est. Le tableau 27 présente les bilans d'éléments nutritifs calculés sur la base de la figure 16. La figure 17 montre le bilan d'azote d'une manière spatiale explicite. Les valeurs positives dans la partie centre - est sont principalement dues aux légumineuses et à la jachère. L'épuisement est élevé autour du Mont Kenya et dans l'Ouest du Kenya.

FIGURE 16
Carte simulée d'utilisation des terres au Kenya

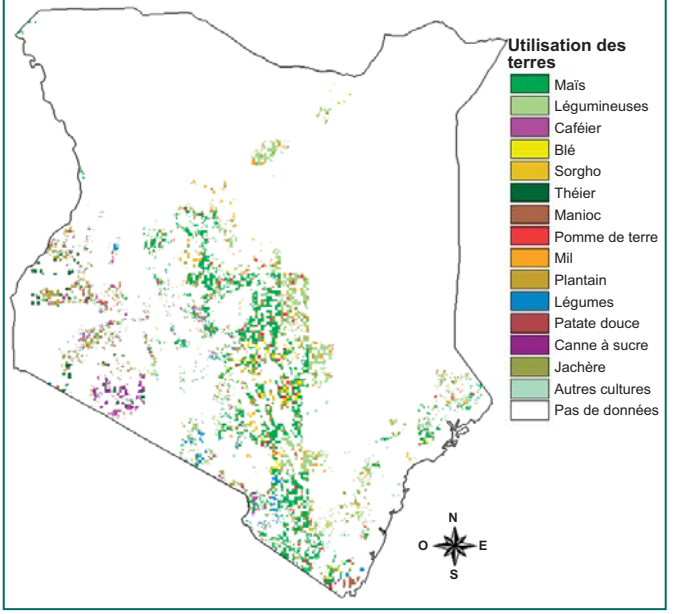


FIGURE 17
Bilan de l'azote pour le Kenya, par cellule d'1-km (gauche) et par cellule agrégée de 20-km (droite)

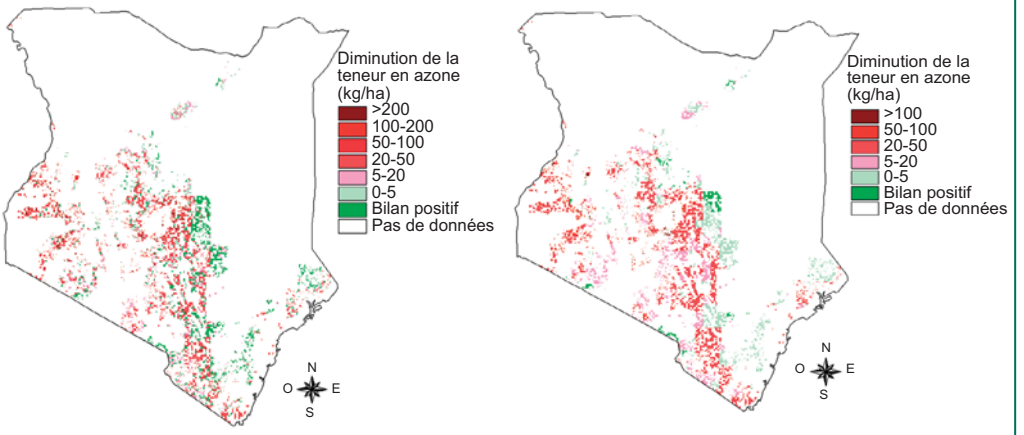


TABLEAU 27
Bilans des éléments nutritifs par culture et total, Kenya

Cultures	Surface	N	P	K
	(ha)		(kg/ha)	
Agrumes	6 521	-7,6	7,8	-17,2
Arachide	15 145	-5,5	-1,6	-22,1
Bananiers	40 333	-25,0	7,8	-35,9
Blé	144 405	-31,0	25,4	-38,3
Caféier	178 136	-22,2	7,3	6,7
Canne à sucre	58 000	-34,7	-10,5	-103,5
Cocotier	15 000	-443,3	-42,0	-75,2
Cotonnier	38 866	-66,3	19,6	-23,1
Fruits, autres	23 482	1,1	53,6	113,7
Jachère	915 802	-28,5	-1,5	-2,4
Légumes	81 523	-51,7	34,3	-53,0
Légumineuses	700 000	-11,5	3,2	-6,4
Maïs	1 523 587	-48,5	-5,0	-35,2
Manioc	98 333	-101,6	-7,3	-45,6
Mil	88 233	-17,1	-4,0	-21,6
Orge	22 267	-26,9	31,6	-26,7
Patate douce	71 333	-63,6	-10,4	-78,5
Plantains	85 333	-70,1	0,8	-26,6
Pomme de terre	94 051	-32,5	10,7	-45,7
Racines, autres	2 000	-21,8	-1,2	-17,8
Riz	14 607	-47,5	3,7	-60,4
Sésame	28 000	-5,9	-2,9	-4,8
Sorgho	136 667	-12,8	-3,3	-22,1
Tabac	13 980	-49,8	15,8	-75,4
Théier	114 964	-97,9	-6,6	-40,1
Tournesol	9 432	-45,9	-4,9	-18,4
Total	4 520 000	-38	0	-23

TABLEAU 28
Bilans des éléments nutritifs par culture et total, Mali

Cultures	Surface	N	P	K
	(ha)		(kg/ha)	
Arachide	190 248	-7,9	-1,6	-7,2
Blé	3 104	-36,7	-8,4	-28,2
Canne à sucre	4 477	-23,9	-17,9	-89,0
Cotonnier	496 401	-10,7	-6,5	-21,4
Fibres	2 000	-4,9	0,2	-3,0
Fruits, autres	3 197	-14,5	-2,5	-64,0
Jachère	1 402 427	-0,5	0,7	0,9
Légumes	48 564	-57,3	-11,0	-54,6
Légumineuses	319 715	-8,6	0,6	-6,9
Maïs	286 232	-29,6	-3,6	-21,2
Manioc	907	-44,7	-6,5	-50,1
Mil	920 416	-22,5	-5,9	-27,3
Patate douce	3 730	-33,9	-7,4	-56,9
Riz	328 494	-5,5	-5,6	-30,6
Sorgho	634 920	-18,9	-6,8	-17,8
Tabac	376	-47,6	-7,4	-71,6
Total	4 650 000	-12,0	-3,0	-15,0

Mali

La carte simulée d'utilisation de la terre pour le Mali (figure 18) montre une dispersion avec le mil et le maïs surtout dans la zone nord plus sèche. Le riz se trouve principalement dans les secteurs irrigués le long du fleuve Niger. Le tableau 28 présente les bilans d'éléments nutritifs pour le Mali basés sur cette carte d'utilisation de la terre. Les cultures vivrières, telles que le mil, le sorgho et le maïs, ont des bilans d'éléments nutritifs plus déficitaires. Les cultures de rente et les légumineuses entraînent un plus faible épuisement. La carte du bilan d'azote du Mali (figure 19) est principalement positive dans la région centrale du Mali (riz et jachère), alors que la bordure nord de la zone agricole montre en moyenne un épuisement plus élevé (mil et maïs).

La figure 20 montre tous les flux d'azote par pays. Au Kenya, l'apport d'engrais minéral et organique est relativement important, tandis qu'au Ghana, un apport plus élevé se fait par retombée atmosphérique en raison de la poussière de l'Harmattan. Les sorties par lixiviation et pertes gazeuses sont légèrement plus fortes au Kenya en raison des apports plus élevés d'engrais

FIGURE 18
Carte simulée d'utilisation des terres au Mali

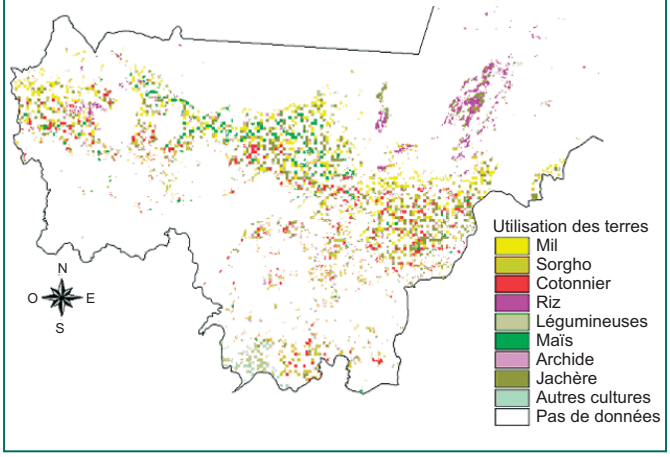


FIGURE 19
Bilan de l'azote pour le Mali, par cellule d'1-km (en haut) et par cellule agrégée de 20-km (en bas)

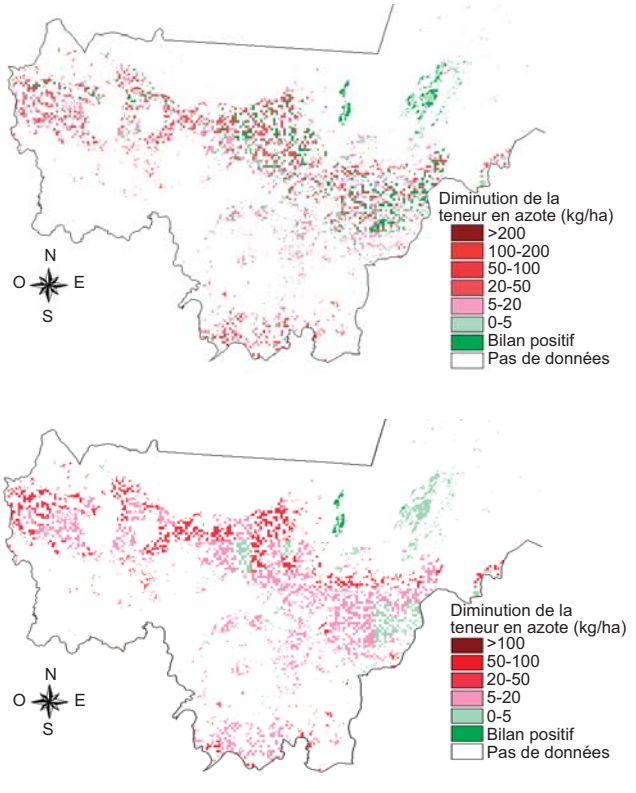


FIGURE 20
Vue d'ensemble des flux d'azote pour le Ghana, le Kenya et le Mali

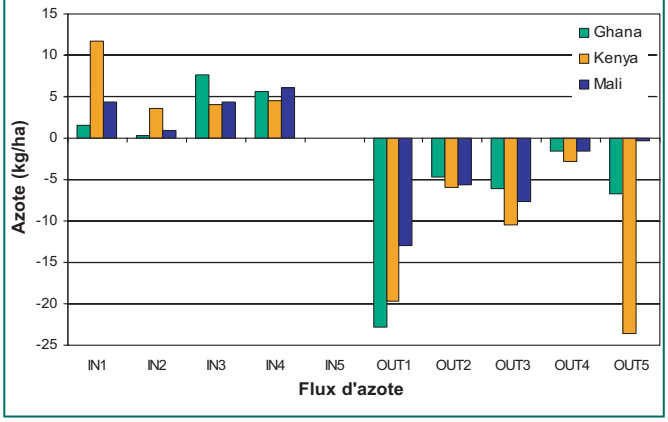
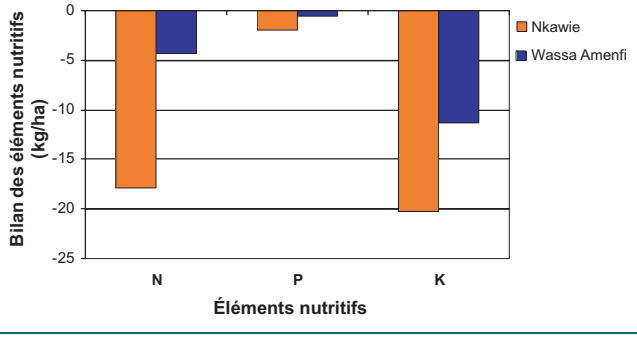


FIGURE 21
Bilan des éléments nutritifs totaux pour les districts de Nkawie et Wassa Amenfi



minéraux. Le plus frappant est l'importance de l'érosion au Kenya, qui est provoquée par la topographie et les sols volcaniques relativement fertiles. L'annexe 8 détaille les flux de N, de P et de K par culture.

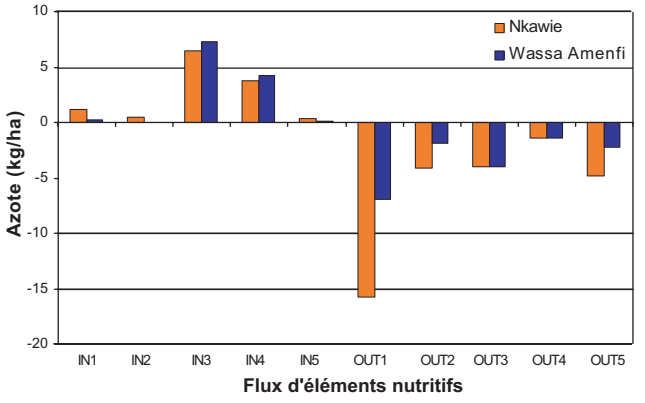
NIVEAU INTERMÉDIAIRE
Système de production à base de cacaoyer au Ghana

La figure 21 présente les bilans d'éléments nutritifs pour les deux districts choisis. Le bilan pour le district de Nkawie est considérablement plus déficitaire que celui pour le district de Wassa Amenfi. La raison principale de cette différence est la surface en cacaoyer, qui est de 58 pour cent de la surface totale dans le district de Nkawie, et 90 pour cent dans le district de Wassa Amenfi. Le bilan des éléments nutritifs pour le cacaoyer est seulement légèrement déficitaire par opposition à la plupart des autres cultures. Ces autres cultures rendent plus déficitaire le bilan total des éléments nutritifs pour le district de Nkawie. Le manioc, l'igname et le taro ont des bilans d'éléments nutritifs fortement déficitaires (tableaux 29 et 30). Ces cultures de racines reçoivent peu d'engrais minéral ou organique, alors que leurs productions exportent beaucoup d'éléments nutritifs.

La figure 22 présente les flux d'éléments nutritifs pour les deux districts. Les exportations d'éléments nutritifs par les productions agricoles (OUT1) représentent les valeurs négatives les plus élevées. Les autres sorties sont plus ou moins d'égale importance. L'aspect le plus saisissant est le très faible apport d'engrais. Le système de culture dépend presque totalement des ressources naturelles, que sont les apports par retombées atmosphériques (IN3) et la fixation d'azote par les arbres et la fixation non-symbiotique (IN4), soit une entrée totale de 12 kg d'azote par

hectare. L'annexe 10 présente les bilans d'éléments nutritifs pour chaque culture.

FIGURE 22
Flux d'azote dans les deux districts au Ghana



Système de production à base de théier-caféier-laiterie au Kenya

Le bilan des éléments nutritifs pour la zone «théier-caféier-laiterie» du district d'Embu est très déficitaire. Toutes les cultures, sauf le théier et le caféier, ont des bilans d'éléments nutritifs fortement déficitaires (tableau 31). Les éléments nutritifs exportés dans les productions agricoles, la lixiviation et, en particulier, l'érosion, contribuent principalement à ce bilan déficitaire (figure 23). Les taux

TABLEAU 29
Bilans des éléments nutritifs pour le district de Nkawie

Culture	Surface (ha)	N	P	K
		(kg/ha)		
Cacaoyer	48 493	-3,2	-0,1	-8,5
Igname	1 175	-55,0	-3,7	-42,9
Jachère	14 600	-0,6	0,9	-2,5
Maïs	11 455	-32,4	-6,3	-20,3
Manioc	11 838	-68,3	-9,6	-59,0
Plantain	11 725	-8,7	-0,3	-35,6
Riz	1 462	7,5	4,0	-9,8
Taro	9 514	-50,8	-3,3	-39,9
Toutes cultures	110 262	-18,0	-1,9	-20,3

TABLEAU 30
Bilans des éléments nutritifs pour le district de Wassa Amenfi

Culture	Surface (ha)	N	P	K
		(kg/ha)		
Cacaoyer	240 961	-1,5	-0,2	-9,2
Igname	1 500	-85,8	-6,0	-63,3
Jachère	7 300	1,8	0,9	-3,2
Légumes	250	-57,8	-7,0	-29,3
Maïs	5 650	-23,8	-5,4	-13,5
Manioc	7 700	-53,3	-7,6	-50,3
Palmier à huile	900	-29,2	-7,2	-54,1
Plantain	5 000	-6,2	-0,5	-35,4
Riz	2 112	10,1	5,0	-7,3
Taro	3 000	-34,0	-1,9	-26,1
Toutes cultures	274 373	-4,3	-0,5	-11,4

FIGURE 23
Flux d'azote dans la zone «théier – caféier – laiterie» du district d'Embu

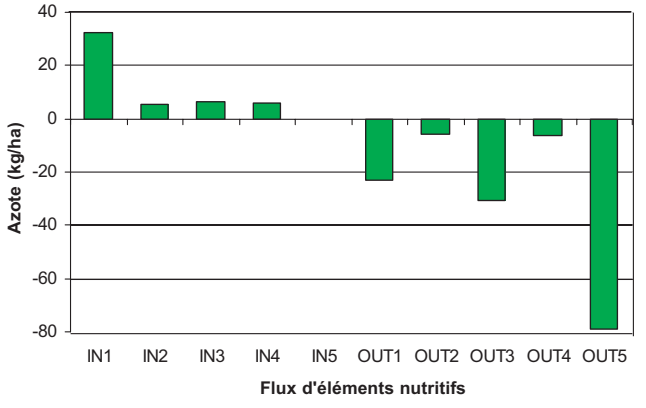
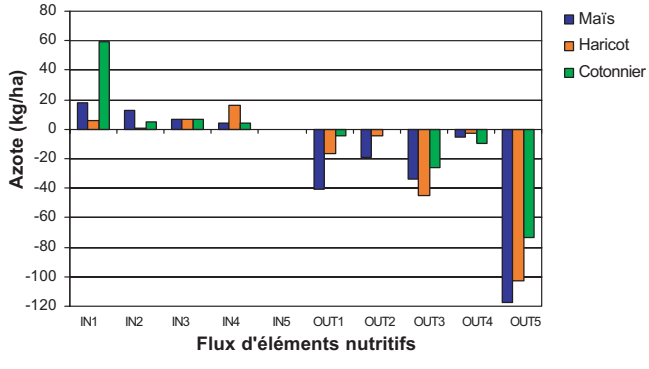


FIGURE 24
Flux d'azote pour trois cultures principales, district d'Embu



d'érosion ne sont pas très élevés, mais les pertes sont grandes étant donnée la teneur élevée du sol en éléments nutritifs. Les sols dans le secteur, développés sur des dépôts volcaniques jeunes, sont assez fertiles avec une teneur élevée en matière organique.

La figure 24 montre les flux de N pour trois cultures importantes dans la zone «caféier-théier-laiterie» du district d'Embu. Tous les apports sont très faibles comparés aux sorties. Les différences entre caféier (culture de rente) et maïs et haricot (cultures vivrières) sont évidentes. La quantité d'engrais minéral (IN1) est plus élevée pour le caféier que pour les cultures vivrières. Cependant, l'utilisation d'engrais sur des cultures de rente peut cesser si les prix du marché mondial sont trop bas, comme c'est maintenant le cas pour le café.

Les pertes d'éléments nutritifs dues à la lixiviation et à l'érosion sont faibles pour la culture pérenne du caféier. Les haricots reçoivent une partie de leur azote nécessaire grâce à la fixation symbiotique (IN4). Cependant, cette quantité est très faible comparée aux pertes. L'érosion (OUT5) est la sortie la plus importante, principalement en raison de la teneur élevée du sol en éléments nutritifs. L'annexe 10 présente les bilans d'éléments nutritifs pour chaque culture.

Système de production à base de cotonnier au Mali

Le bilan global des éléments nutritifs pour le système de production à base de coton dans la région de Koutiala est modérément déficitaire (tableau 32). Pour le phosphore, le bilan est positif. Le bilan des éléments nutritifs pour le cotonnier

TABLEAU 31
Bilans des éléments nutritifs pour la zone «théier – caféier - laiterie» district d'Embu

Culture	Surface	N	P	K
	(ha)		(kg/ha)	
Caféier	8 813	-39,1	-7,6	-7,3
Haricot	2 748	-142,0	-25,9	-23,8
Herbe à éléphant	602	-169,5	-22,6	-179,2
Jachère	1 800	-24,6	-0,9	-1,1
Maïs	5 143	-174,2	-31,2	-73,0
Manioc	515	-285,1	-52,1	-96,3
Maranta	260	-52,0	-6,8	-47,0
Niébé	280	-107,7	7,5	-26,6
Patate douce	140	-177,8	-32,3	-91,9
Pomme de terre	678	-144,9	33,3	-45,3
Sorgho	207	-104,5	-34,2	-30,8
Théier	1 092	-16,3	-1,4	-2,3
Toutes cultures	20 678	-95,6	-14,9	-33,1

TABLEAU 32
Bilan des éléments nutritifs pour la région de Koutiala

Culture	Surface	N	P	K
	(ha)		(kg/ha)	
Arachide	13 411	-7,0	-3,0	-10,5
Cotonnier	144 713	-13,8	12,4	17,4
Jachère	227 200	-2,9	0,6	0,1
Maïs	57 020	-25,9	-0,9	-19,1
Mil	101 294	-20,4	-5,7	-23,8
Niébé	5 637	-11,5	-2,8	-5,4
Riz	5 569	-4,4	0,8	-18,0
Sorgho	130 254	-15,6	-2,1	-25,2
Toutes cultures	685 098	-12,3	1,4	-6,6

compense en partie les autres cultures, parce que le cotonnier reçoit une grande quantité de fumier et d'engrais minéraux. La plupart des sorties importantes sont dues aux productions agricoles (OUT1) et à la lixiviation (OUT3) (figure 25). Les pertes par érosion sont relativement basses parce que le sol est très pauvre en éléments nutritifs.

Les principales cultures dans la région de Koutiala sont le cotonnier comme

FIGURE 25
Flux d'azote dans le système de production à base de cotonnier, région de Koutiala

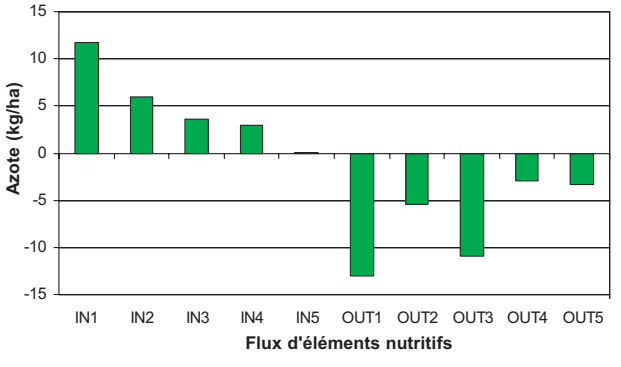


FIGURE 26
Flux d'azote pour trois cultures principales, région de Koutiala

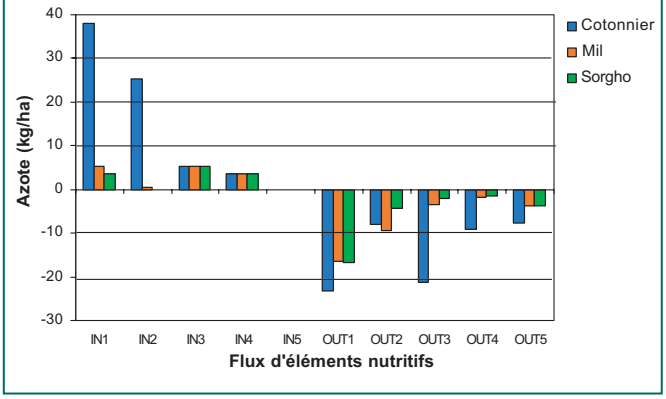
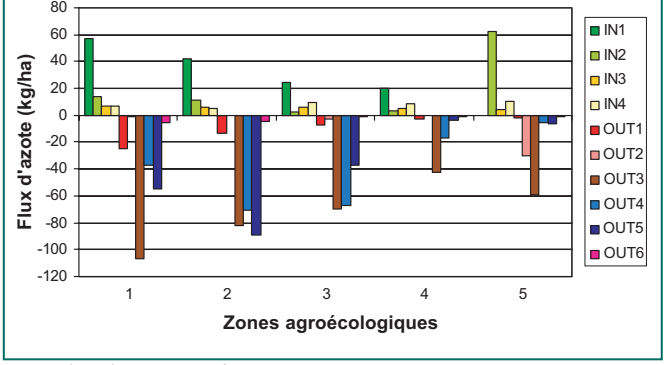


FIGURE 27
Flux d'azote au niveau d'une exploitation agricole par zone agroécologique



Source: adapté de SC-DLO *et al.*, 2000.

TABLEAU 33
Bilan d'éléments nutritifs par ZAE

ZAE	N	P	K
1	-143	-4,0	-11,7
2	-197	-11,6	-30,3
3	-143	-3,6	-31,2
4	-30	8,8	1,8
5	-27	-1,9	6,6

Source: SC-DLO *et al.*, 2000.

culture de rente et le mil et le sorgho en tant que cultures vivrières. Les différences entre ces cultures sont évidentes. Le sorgho et le mil reçoivent peu d'engrais, alors que les exportations dues aux productions agricoles et l'enlèvement des résidus de récolte sont semblables à ceux du cotonnier (figure 26). Cependant, le mil et le sorgho reçoivent indirectement une fertilisation vu que l'engrais appliqué au cotonnier a un effet sur le mil et le sorgho lors du cycle de culture suivant. L'annexe 10 présente les bilans d'éléments nutritifs pour chaque culture.

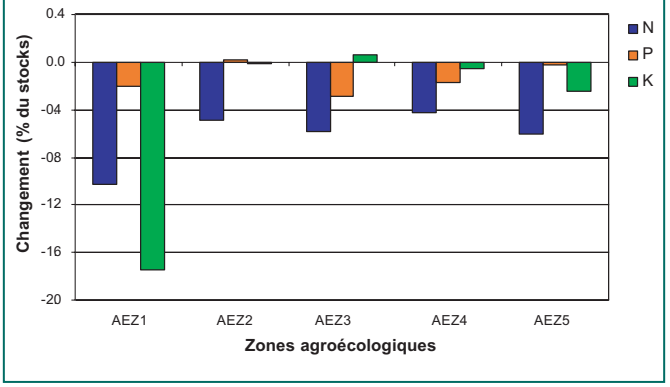
NIVEAU DÉTAILLÉ

Exploitations agricoles du District d'Embu, Kenya

Le projet VARINUTS a suivi pendant deux années 15 exploitations agricoles, 3 par zone agroécologique (ZAE) (tableau 3), en utilisant l'approche NUTMON. Les bilans d'éléments nutritifs montrent des gradients clairs selon les ZAEs (tableau 33). Bien que ces résultats soient par ZAE, donc au niveau intermédiaire, l'étude est basée sur les moyennes de trois exploitations agricoles par ZAE. Ceci signifie qu'aucune donnée de niveau intermédiaire n'étant impliquée, cette étude relève donc du niveau détaillé. Les exploitations agricoles dans les zones plus élevées se basent davantage sur des intrants externes et ont des pertes plus fortes dues

à la lixiviation, aux pertes gazeuses et à l'érosion (figure 27). Bien que les ZAE1, ZAE2 et ZAE3 semblent avoir un bilan global comparable, les résultats sont sensiblement différents quand les pertes d'éléments nutritifs sont comparées aux stocks d'éléments nutritifs. La figure 28 montre que la ZAE1 a les pertes d'éléments nutritifs relatives les plus élevées.

FIGURE 28
Bilan des éléments nutritifs en relation avec les stocks d'éléments nutritifs dans le sol



Les variations entre exploitations agricoles dans chaque ZAE et entre ZAEs étaient très grandes pour chaque propriété du sol (tableau 34). Les coefficients de variation moyens et le nombre d'unités de sol identifiées peuvent servir d'indicateurs de variation au niveau de l'exploitation agricole. Le nombre moyen d'unités de sol identifiées par exploitation agricole diminue de cinq dans les parties supérieures du district à trois dans la ZAE5 (tableau 35). La variation entre les unités est significative et particulièrement élevée dans les zones où peu d'unités ont été identifiées.

Les CVs ont également été calculés pour chaque unité individuelle de sol avec plus de deux échantillons. A nouveau, particulièrement dans la ZAE5, des CVs élevés ont été trouvés. Une raison possible est que l'identification des unités de sol est plus difficile en raison de la topographie plate.

TABLEAU 34
Propriétés des sols pour toutes les exploitations agricoles et ZAEs

ZAE	Exploitation	Surface (ha)	pH	C_{tot} (g/kg)	N_{tot} (g/kg)	P_{tot} (mg/kg)	P_{olsen} (mg/kg)	K (mmol/kg)
1	1	1,2	4,1	39,4	9,2	1 998	4,85	5,4
	2	1,1	4,3	28,2	7,2	2 429	2,42	2,9
	3	1,7	4,9	29,9	6,2	2 207	3,18	5,3
2	4	1,5	4,6	24,8	5,5	2 030	4,48	9,1
	5	1,1	4,2	23,1	7,1	2 256	1,32	5,8
	6	2,3	4,6	26,5	6,5	1 998	2,84	19,3
3	7	1,3	4,3	22,8	3,8	2 122	3,18	19,3
	8	1,7	4,4	25,6	4,8	1 876	1,85	3,9
	9	3,8	4,9	20,4	4,6	1 696	1,95	8,2
4	10	2,4	5,5	17,8	2,2	1 035	1,94	16,8
	11	2,4	6,0	15,7	1,9	568	6,16	8,7
5	13	4,1	6,4	7,7	0,7	510	6,25	5,2
	14	3,7	4,5	5,5	0,9	3 990	11,28	3,0
	15	1,4	5,2	6,4	1,1	2 669	16,14	6,2

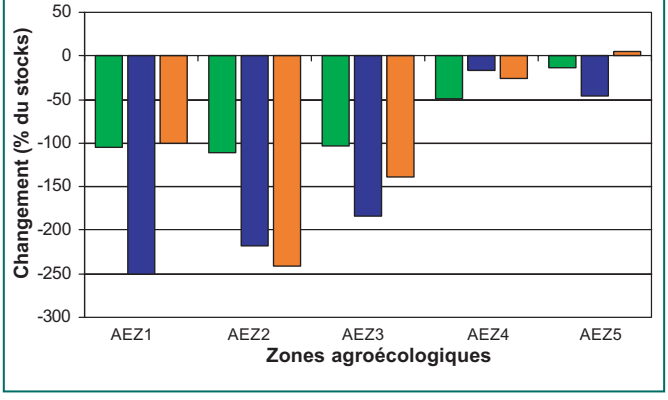
Source: Stoorvogel *et al.*, 2000.

TABLEAU 35
Coefficients de variation moyens pour les propriétés des sols

ZAE	Nb. d'unités	CV pour propriétés entre unités (pour cent)					CV pour propriétés dans les unités (pour cent)				
		pH	N_{tot}	P_{tot}	C_{tot}	K	pH	N_{tot}	P_{tot}	C_{tot}	K
1	4,3	11	20	11	11	55	8	25	9	13	56
2	5,3	11	13	7	19	65	9	10	8	16	92
3	4,7	14	31	13	17	80	6	8	9	15	61
4	3,3	4	10	20	15	25	4	9	12	13	56
5	3,0	52	46	101	49	83	2	22	12	17	79

Source: Smaling *et al.*, 2002.

FIGURE 29
Bilan de l'azote au niveau d'une exploitation par zone agroécologique



La figure 29 montre que les bilans d'éléments nutritifs des exploitations agricoles sont également variables. Pour partie, ces différences reflètent les propriétés des sols, par exemple la lixiviation est inférieure dans les sols ayant une teneur élevée en matière organique, mais par ailleurs, cela reflète aussi des différences dans la gestion, telles que le choix des cultures, l'application d'engrais, et les mesures de conservation du sol.

Villages au Mali-Sud, Mali

Les villages de M'Peresso et de Noyaradougou au Mali ont été étudiés pour l'analyse au niveau détaillé. Les deux villages sont dans la région CMDT de Mali-Sud. Au premier abord, ils ont des systèmes de production comparables (Kanté, 2001). Le cotonnier est la culture de rente de base et les céréales, telles que le maïs, le sorgho et le mil, sont les principales cultures vivrières. Le cheptel est important. Un examen plus approfondi montre que la pression foncière est considérablement plus élevée à M'Peresso (densité de population plus forte, proportion plus importante des terres cultivées par rapport à la surface totale des terres) et, par conséquent, la gestion des résidus de récolte est plus intensive à M'Peresso. De même, on pourrait dire que Noyaradougou souffre d'une pénurie de main-d'œuvre telle qu'elle empêche le village de réutiliser tous les résidus de récolte. Le brûlis des résidus représente 3 pour cent à M'Peresso par rapport à 16 pour cent à Noyaradougou. En outre, les augmentations de rendement du cotonnier dues à l'application de fumier sont plus élevées à M'Peresso. Noyaradougou emploie plus d'engrais minéraux pour compenser cela.

Les tableaux 36 à 38 montrent certaines caractéristiques générales des deux villages. Les stocks d'azote total (0-40 centimètres) sont compris entre 600 kg/ha à M'Peresso et 900 kg/ha à Noyaradougou. Les stocks de P total (0-40 centimètres) sont entre 400 kg/ha à M'Peresso et 600 kg/ha à Noyaradougou. Ces différences sont des expressions de la gestion de la fertilité du sol (tableau 39) et des bilans d'éléments nutritifs (tableau 40).

TABLEAU 36
Caractéristiques de M'Peresso et Noyaradougou

Caractéristiques	M'Peresso	Noyaradougou
Altitude (m)	297	531
Zone climatique	Semi-aride	Subhumide
Région CMDT	Koutiala	Sikasso
Ethnie dominante	Minianka	Senoufo
Nombre d'habitants	977	557
Nombre d'émigrants	114	453
Nombre d'exploitations agricoles	64	29
Densité du cheptel (UBT/ha)*	0,36	0,12

* UBT = Unité de Bétail Tropical (bovin standard 250 kg).
Source: Kanté, 2001.

Les membres des exploitations agricoles ont été classés en trois groupes par rapport à la gestion des éléments nutritifs. A cette fin, l'interview s'est concentré sur trois groupes: les hommes plus âgés, les hommes plus jeunes, et les femmes. La division (classe 1 = haute, classe 3 = basse) a en grande partie reflété: le nombre de membres dans le ménage, la possession d'animaux et, par conséquent, du

TABLEAU 37
Surfaces moyennes cultivées par exploitation agricole dans deux villages du Mali

Village	Jachère	Cotonnier	Maïs	Sorgho	Mil	Arachide
	(ha)					
M'Peresso	5,8	4,3	0,9	3,2	2,6	1,0
Noyaradougou	5,4	4,4	2,9	1,0	0,7	0,3

Source: Kanté, 2001.

TABLEAU 38
Quantités moyennes d'engrais minéral utilisé dans deux villages, Mali

Villages	Cultures	Complexe Coton		Complexe Céréales		Urée	
		kg/ha	Champs**	kg/ha	Champs**	kg/ha	Champs**
M'Peresso	Cotonnier Maïs	123	58	-	-	53	58
	Sorgho	91	19	98	25	84	39
		72	6	-	-	36	6
Noyaradougou	Cotonnier	149	70	130	5	73	70
	Maïs	135	9	100	68	89	68
	Sorgho	-	-	98	8	52	11
	Mil	142	6	85	26	64	29
	Niébé	-	-	159	10	183	12

* Complexe coton NPK = 14:9.6:10 et Complexe céréales NPK = 15:6,5:12.5.
** Nombre de champs fertilisés.
Source: Kanté, 2001.

fumier, et les chariots. La classe 3 compense le manque de fumier en appliquant plus d'engrais minéral par hectare (mais elle a moins d'hectares). Une nouvelle division de ce qui précède produit les sorties par village par classe (tableau 41). Une évaluation annuelle de la classification peut avoir comme conséquence que des fermiers sont promus ou au contraire relégués dans une autre classe.

TABLEAU 39
Différences observées entre les deux villages, Mali

	M'Peresso	Noyaradougou
Rapport Jachère/ Terre cultivée	0,6	1,4
N total dans le sol (g/kg)	0,20	0,31
P total dans le sol (mg/kg)	126	171
Fumier disponible (tonnes)	26	11
Engrais minéral utilisé sur le cotonnier (kg/ha)	102	155
Résidus de récolte pour la nutrition des animaux (%)	35	15
Résidus de récolte pour le compost (%)	16	43
Résidus de récolte brûlés (%)	3	16
Bilan partiel de l'azote pour le cotonnier (kg/ha)	58	22
Bilan partiel de l'azote pour le maïs (kg/ha)	-30	2

Source: Kanté, 2001.

TABLEAU 40
Bilan partiel des éléments nutritifs pour les deux villages, Mali

	M'Peresso			Noyaradougou		
	N	P	K	N	P	K
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
OUT1	18,7	2,2	4,7	25,2	3,3	6,3
OUT2	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

Source: Kanté, 2001.

TABLEAU 41
Bilan partiel de l'azote pour différentes classes et villages, Mali

	M'Peresso			Noyaradougou		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Nombre d'exploitations	3	10	7	8	5	7
IN1	15,9	16,4	13,4	42,9	42,1	40,6
IN2	23,8	16,4	14,5	11,5	8,1	11,8
OUT1	21,6	18,8	17,3	28,2	24,0	22,6
OUT2	19,4	13,3	13,1	17,3	15,0	17,3
Bilan partiel	-1,3	0,7	-2,5	8,9	11,2	12,5

Source: Kanté, 2001.

Chapitre 5
Discussion

UNE COMPARAISON DES MÉTHODOLOGIES AU NIVEAU GLOBAL: 1990 ET 2003

Les résultats au niveau global montrent que le Kenya présente la diminution de la teneur en éléments nutritifs la plus élevée pour l'azote et la potasse, suivi par le Ghana et le Mali (tableau 42). Le bilan pour le phosphore est légèrement déficitaire au Ghana et au Mali, alors qu'il est neutre pour le Kenya. Une raison possible est que les exploitants agricoles au Kenya ont appliqué 30 000 tonnes de phosphore avec l'engrais minéral (IN1), ce qui représente 15 fois ce qui est appliqué au Ghana et 5 fois au Mali. Cependant, la diminution du phosphore peut également être sous-estimée dans le flux d'érosion, car le phosphore total est dérivé du phosphore disponible. Dans les sols volcaniques du Kenya, le phosphore disponible peut être à un niveau faible, même avec un phosphore total élevé du fait que la plupart du phosphore est fortement lié aux particules de sol. Le tableau 42 montre également que les résultats de l'étude continentale par Stoorvogel et Smaling (1990) sont raisonnablement en conformité avec ceux de la présente étude, en particulier pour le Ghana et le Mali. L'épuisement des éléments nutritifs au Kenya est moins grave qu'il avait été prévu pour l'an 2000 dans la précédente étude par Stoorvogel et Smaling.

Le procédé de calcul du niveau global présenté au chapitre 3 a subi un certain nombre d'améliorations méthodologiques importantes par rapport à l'étude continentale originale de Stoorvogel et Smaling. D'abord, la méthodologie a été précisée dans l'espace, ce qui a permis de prendre en compte la variation spatiale des sols et du climat. Cela a également fourni la possibilité d'indiquer les secteurs du pays ayant des baisses d'éléments nutritifs élevées ou faibles. Les procédures pour calculer les flux d'éléments nutritifs ont également subi une amélioration significative (tableau 43). De plus, les stocks d'éléments nutritifs du sol ont été

TABLEAU 42
Diminution des éléments nutritifs, comparaison entre la présente étude (2003) et Stoorvogel et Smaling (1990)

	Niveau global			Stoorvogel et Smaling, 1983*			Stoorvogel et Smaling, 2000*		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
Ghana	-27	-4	-21	-30	-3	-17	-35	-4	-20
Kenya	-38	0	-23	-42	-4	-29	-46	-1	-36
Mali	-12	-3	-15	-8	-1	-7	-11	-2	-10

* Stoorvogel et Smaling, 1990.

TABLEAU 43
Améliorations dans la méthode de calcul par rapport à l'étude de 1990

Flux	Améliorations méthodologiques
IN1	Les données d'utilisation des engrais par culture sont disponibles (IFA/IFDC/FAO, 2000)
IN2	Cartes de densité du cheptel avec différenciation entre bovins, petits ruminants et volailles
IN3	Carte des retombées de l'Harmattan et plus de valeurs disponibles à partir de la littérature
IN4	Pourcentages de fixation d'azote basés sur beaucoup plus de littérature
IN5	Introduction d'un feedback entre érosion et sédimentation via le modèle LAPSUS
OUT1	Comparable avec l'étude de 1990
OUT2	Comparable avec l'étude de 1990
OUT3	Nouveaux modèles de lixiviation, basés sur beaucoup plus de données, spécialement pour N (De Willigen, 2000)
OUT4	Nouveau modèle de régression, basé sur beaucoup plus de données de IFA/FAO (2001)
OUT5	Érosion simulée avec un modèle dynamique de paysage LAPSUS (Schoorl *et al.*, 2002)

mesurés pour chaque unité de sol au lieu du seul classement dans trois classes de fertilité du sol.

COMPARAISON ENTRE NIVEAU GLOBAL ET INTERMÉDIAIRE ET ENTRE NIVEAU INTERMÉDIAIRE ET DÉTAILLÉ

Cette étude a introduit le niveau intermédiaire afin d'ajouter de la valeur aux approches qui existent au niveau national et au niveau de l'exploitation agricole. L'hypothèse était que le niveau intermédiaire pourrait offrir un point d'entrée approprié pour les décideurs et l'intervention du secteur privé, pour lesquels le niveau global et le niveau détaillé ne sont pas adaptés pour définir la politique au niveau sous-national. Dans un tel système de niveau intermédiaire, la composante commerciale fonctionne comme moteur du système de production et permet l'intensification et l'expansion. Cette composante commerciale peut aussi fonctionner comme moteur de la gestion de la fertilité du sol.

Cette étude a montré qu'il est possible de construire un niveau intermédiaire approprié pour le bilan des éléments nutritifs si des données suffisantes sont disponibles. Les résultats du niveau intermédiaire fournissent des informations qui ne peuvent pas être déduites des études de niveau global ou de niveau détaillé. Par exemple, au Mali, le bilan au niveau national des éléments nutritifs par culture ne fournit aucun point d'intervention pour la CMDT et les producteurs de coton car l'échelle est trop grossière pour des politiques ciblées et pour un appui institutionnel. Au niveau détaillé, les études villageoises montrent des différences importantes pour ce qui est de la gestion des éléments nutritifs, basées sur la densité de population. Pour la CMDT, il est important de connaître de telles différences et leurs causes. Cependant, en même temps, sa structure efficace la force à agir sur la base des buts recherchés et moyennes de production au niveau régional.

Ce qui précède vaut également pour la ZAE2 au Kenya, où les différences dans les bilans d'éléments nutritifs entre les exploitations agricoles étaient importantes (figure 29). Dans ce cas, les différences entre ZAE sont, malgré la variation d'une exploitation agricole à l'autre, plus significatives comme points d'entrée pour les décideurs et autres personnes intéressées travaillant au niveau du district. Pour

TABLEAU 44
Comparaison du bilan d'éléments nutritifs entre le niveau global et le niveau intermédiaire

	Niveau global			Niveau intermédiaire		
	N	P	K	N	P	K
Nkawie, Ghana	-42	-5	-23	-18	-2	-20
Wassa Amenfi, Ghana	-15	-2	-19	-4	-1	-11
Koutiala, Mali	-8	-3	-12	-12	1	-7

une intervention, il est également important de savoir que l'épuisement relatif est beaucoup plus élevé dans la ZAE1 que dans les autres zones (figure 28). Au Ghana, le bilan des éléments nutritifs au niveau global donne des valeurs pour les diverses cultures dans différentes cellules de quadrillage, et montre que la culture du cacaoyer ne cause pas un épuisement des éléments nutritifs plus important que les autres cultures. Cependant, cela ne montre pas le développement de la production de cacao dans les deux districts, et comment cela affecte le niveau de fertilité du sol. Pour ce faire, et pour proposer des actions, les bilans des éléments nutritifs au niveau intermédiaire sont nécessaires. Le chiffre du bilan global est dans ce cas moins important que les différences entre les cultures et les flux isolés qui ont un coût (IN1 et IN2, OUT1 et OUT2).

Le tableau 44 compare les bilans d'éléments nutritifs de niveau intermédiaire aux bilans de niveau global des secteurs étudiés. Il n'a pas été possible de faire cette comparaison pour la zone «théier – caféier – laiterie» du district d'Embu parce que ce secteur d'étude était trop petit pour déterminer un bilan réaliste des éléments nutritifs au niveau global, vu que la résolution à ce niveau est trop faible. Le tableau montre que les chiffres «globaux» pour le Ghana sont considérablement plus négatifs que les chiffres «intermédiaires». C'est parce que la surface en cacaoyer dans les secteurs étudiés est sous-estimée au niveau global, laissant ainsi la place à des cultures qui ont des bilans d'éléments nutritifs plus déficitaires. Le niveau intermédiaire corrige cette «erreur», qui provient de l'approche de la carte d'utilisation de la terre au niveau global (chapitre 3). Les résultats de niveau global pour le Mali sont raisonnablement conformes à ceux du niveau intermédiaire, ce qui résulte en partie de la similitude des chiffres d'utilisation de la terre entre les 2 niveaux (tableau 45).

À la différence du niveau global, l'analyse du niveau intermédiaire peut également prendre en compte des décisions spécifiques de gestion et des différences physiographiques. Cela représente une valeur ajoutée par rapport à l'approche de niveau global. Ceci explique également les différences

TABLEAU 45
Comparaison des surfaces récoltées pour la région de Koutiala

Cultures	Niveau global	Niveau intermédiaire
	(pour cent)	
Arachide	5	2
Cotonnier	21	21
Jachère	38	33
Maïs	1	8
Mil	11	15
Niébé	5	1
Riz	0	1
Sorgho	18	19

entre les résultats au niveau global et au niveau intermédiaire. Par exemple, au niveau intermédiaire au Ghana, les faibles taux d'érosion sous cacaoyer ont été inclus dans le modèle OUT5, alors que l'érosion au niveau global n'est pas liée au mode d'utilisation de la terre, surestimant ainsi l'érosion et, par conséquent, l'épuisement des éléments nutritifs par le cacaoyer.

Les études de niveau détaillé fournissent une image de la variabilité à l'intérieur d'une unité de niveau intermédiaire. Il est possible d'inclure des facteurs appropriés de gestion, et leur suivi peut vérifier si les changements dans la gestion des éléments nutritifs influent sur le bilan de ces éléments et sur le revenu de l'exploitation. Au niveau intermédiaire, des interventions peuvent être ciblées sur la base de la variation de niveau détaillé en classant les différentes exploitations agricoles et les villages, par exemple, en «bons», «moyens» ou «mauvais» gestionnaires des éléments nutritifs. La figure 29 illustre les différences existant entre les exploitations agricoles dans le district d'Embu. Les interventions peuvent ainsi être adaptées en fonction de la diversité et de la dynamique en matière de gestion des éléments nutritifs observées dans le secteur. Les villages étudiés au Mali ont mis en évidence l'importance de la densité de population et de la surface de terre disponible comme moteurs de la production cotonnière et de la gestion des éléments nutritifs des exploitations agricoles. M'Peresso, avec une pression plus élevée sur la terre, a un plus grand cheptel, emploie plus de résidus de récolte et moins d'engrais minéral, et a une fertilité du sol inférieure. Noyaradougou, avec une pression inférieure sur la terre, a peu de bétail, emploie peu de résidus de récolte et plus d'engrais minéral, ce qui a comme conséquence un bilan plus positif des éléments nutritifs. Pour la CMDT, au niveau intermédiaire, ceci pourrait amener à une approche de la filière à deux niveaux, c.-à-d. pour des secteurs sous pression foncière et ceux avec moins de pression.

COMPARAISON DU NIVEAU INTERMÉDIAIRE ENTRE LES PAYS

Le bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire montre de grandes différences entre les trois pays (tableau 46). Ces différences proviennent de conditions physiographiques variées et de la gestion. Le système de production basé sur le cacaoyer au Ghana reçoit très peu d'intrants, ce qui a comme conséquence des rendements faibles et un épuisement lent mais régulier des éléments nutritifs du sol. D'autre part, le système de production basé sur le cotonnier au Mali est un système avec des intrants relativement importants et donc un faible épuisement du sol, ou même un bilan positif dans le cas du phosphore.

Dans chacun des trois systèmes de production, les cultures de rente montrent un épuisement moindre des éléments nutritifs, ou même un bilan positif, tandis que les cultures vivrières ont des bilans en éléments nutritifs plus déficitaires. Les raisons d'un moindre épuisement varient. Le cacaoyer au Ghana reçoit très peu d'intrants, mais a également de faibles exportations en raison de la production peu élevée. De plus, le cacaoyer est une culture pérenne ombragée, ainsi la lixiviation et l'érosion sont faibles. Le caféier et le théier au Kenya reçoivent plus d'engrais que les cultures vivrières, mais la lixiviation et l'érosion demeurent des sorties

importantes. Le cotonnier au Mali fonctionne comme le moteur du système de production. Les apports d'intrants relativement élevés donnent une production assez importante de coton, tandis que les cultures vivrières bénéficient de l'effet résiduel de l'engrais lors du cycle de culture suivant. En plus de l'effet positif des cultures de rente sur le bilan des éléments nutritifs, elles devraient également entraîner une amélioration des revenus des exploitants agricoles. Cependant, ceci dépend considérablement a/ de l'approvisionnement et du prix sur le marché mondial, b/ des imperfections du marché en raison de la protection ou des exigences de qualité des acheteurs et c/ de l'infrastructure et de l'efficacité nationales dans la manutention des produits.

TABLEAU 46
Bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire

Secteur d'étude et culture	N	P	K
		(kg/ha)	
Ghana, district de Nkawie	-18	-2	-20
Cacaoyer	-3	0	-9
Ghana, district de Wassa Amenfi	-4	-1	-11
Cacaoyer	-2	0	-9
Kenya, district de Embu	-96	-15	-33
Caféier	-39	-8	-7
Théier	-16	-1	-2
Mali, région de Koutiala	-12	1	-7
Cotonnier	-14	12	17

PROBLÈMES DE DONNÉES

Niveau global

Les données spatiales au niveau global étaient largement disponibles par suite des nombreuses cartes mondiales et continentales compilées ces dernières années. Les données continentales suivantes étaient disponibles: la carte des sols du monde (FAO/UNESCO, 2003), la carte de couverture des terres (USGS *et al.*, 2000), les modèles numériques de terrain (Digital Elevation Model = DEM) de la base de données géographiques HYDRO1k (USGS, 1998), la carte des précipitations (Leemans et Cramer, 1991), la carte d'irrigation (Döll et Siebert, 2000), la carte de densité du bétail et la carte de densité des petits ruminants (FAO, 2001a), la carte de densité des volailles et une carte des retombées de l'Harmattan. Ces données ont permis des calculs explicites de la plupart des apports et sorties d'éléments nutritifs. Il a été parfois nécessaire de diviser des valeurs nationales de manière équivalente pour tout le pays parce qu'aucune donnée spatiale n'était disponible, et ce, pour les engrais minéraux (IN1), et, à un moindre degré, les productions agricoles (OUT1) et les résidus de récolte (OUT2).

Les données étaient de qualité différente. Par exemple, le DEM, avec une résolution de 1 kilomètre, est basé sur des mesures satellitaires et peut être considéré comme étant de haute qualité. La carte de couverture des terres a également une résolution de 1 kilomètre et est basée sur des images satellitaires de 1992-93, mais ces images ont dû être classifiées et les cartes en résultant sont contestables. Les cartes classifiées devraient être vérifiées localement au champ. Cependant, cela n'a pas été fait sur une grande échelle. Ces cartes sont basées sur des données primaires, mais d'autres cartes, par exemple les cartes de densité du bétail, sont dérivées de sources secondaires, telles que le climat, le sol et la

population humaine (FAO, 2001a). La carte des retombées de l'Harmattan est la carte la plus imprécise parce qu'elle est basée sur des données limitées de la littérature, qui ont été interpolées selon les modèles globaux de mouvements des vents. Cependant, ces cartes et données sont probablement les meilleures à notre disposition.

L'exactitude des données tabulaires diffère également. Les données de FAOSTAT se fondent sur des statistiques nationales de qualité différente. La qualité des statistiques est moyenne pour le Ghana et le Mali et elle est faible pour le Kenya selon la FAO (http://faostat.fao.org/abcdq/about.htmx). Toutes les données de culture ont été basées sur des enquêtes par échantillonnage et non pas sur les données d'un recensement complet. Les données sur les animaux étaient normalement mieux enregistrées et disponibles en tant que données de recensement total.

La qualité des modèles de régression, employés pour calculer la lixiviation et les pertes gazeuses, est toujours sujette à discussion, du fait que de tels modèles sont basés sur une base de données limitée, et qu'ils ne sont pas prévus pour une utilisation en dehors de leurs propres frontières. Les frontières pour le modèle de régression de la lixiviation de l'azote sont: 40 à 2 000 millimètres de précipitations, 3 à 54 pour cent d'argile, 0,25 à 2 m d'épaisseur par horizon, basées sur 100 mesures (De Willigen, 2000). Pour le modèle de régression de la lixiviation de la potasse, seules 26 mesures étaient disponibles (ce qui a limité l'extension du champ): 1,3 à 8,1 cmol/kg pour la CEC, 211 à 2 420 millimètres de précipitations, et 0 à 273 kg/ha pour la quantité d'engrais.

Niveau intermédiaire

La disponibilité des données au niveau intermédiaire était beaucoup plus faible qu'au niveau global parce que toutes les données ne sont pas collectées au niveau du district ou de la province. De plus, la surface était souvent trop grande pour une enquête représentative des exploitations agricoles. Les données spatiales à une échelle représentative n'étaient pas disponibles ou étaient difficiles à obtenir. La plupart des données pédologiques ont été dérivées des cartes nationales avec des échelles de 1:250 000 (Ghana) ou 1:1 000 000 (Kenya). Celles-ci ne fournissaient pas de détail suffisant au niveau intermédiaire ou n'étaient pas reliées aux propriétés quantitatives du sol.

Les cartes d'utilisation de la terre ne sont généralement pas disponibles au niveau intermédiaire, rendant difficile l'emploi de la procédure développée pour le niveau global. De plus, cette procédure est basée sur l'adaptabilité des cultures. Au niveau intermédiaire, d'autres facteurs tels que la gestion et l'historique de l'utilisation de la terre sont plus importants et ils sont nécessaires afin de rendre le niveau utile. La résolution du quadrillage de niveau global de 1 kilomètre serait également trop grossière pour le niveau intermédiaire. Les photographies aériennes et l'imagerie satellitaire seraient très utiles, mais ne sont pas toujours disponibles.

De toutes les données exigées, la plus difficile à obtenir portait sur l'utilisation d'engrais. Souvent, seules les doses recommandées d'engrais étaient

disponibles (Kenya). De telles doses sont souvent plus fortes que les doses réelles d'application. Alternativement, il est possible de déduire les statistiques régionales des statistiques nationales, comme cela a été fait pour le Ghana. Au Mali, des données d'enquête étaient disponibles, mais leur validité pour la région entière de la CMDT était inconnue parce que la distribution des points d'échantillonnage était inconnue. La qualité des données n'était pas toujours fiable. Des erreurs ont été trouvées en comparant de telles données à celles obtenues au niveau global. Par exemple, le rendement calculé, basé sur la production et la surface récoltée, ne devrait pas être très différent des données de FAOSTAT. Ce type d'erreur s'est produit fréquemment et provenait habituellement de fautes de frappe, par exemple 12 000 kg/ha au lieu de 1 200 kg/ha de maïs.

Niveau détaillé

L'analyse de niveau détaillé a seulement employé des données d'enquête des exploitations agricoles, combinées avec des modèles de régression. La qualité des données était normalement bonne, mais il n'était pas facile d'établir la représentativité des exploitations agricoles choisies pour le niveau intermédiaire. Seules des exploitations agricoles sélectionnées ont été enquêtées, alors que la variation est la plus forte au niveau détaillé. Par exemple, la variabilité des propriétés de sol entre différentes exploitations agricoles dans une ZAE était plus élevée que la variation entre les différentes ZAE, comme l'a montré l'étude VARINUTS dans le district d'Embu (tableau 34; SC-DLO *et al.*, 2000). Les données spatiales sont souvent disponibles au niveau détaillé ou sont relativement faciles à créer. Avec l'aide de l'exploitant agricole, il est possible de faire rapidement une carte des sols ou des cultures parce que la surface est limitée. Cependant, enquêter et suivre un échantillon représentatif dans une unité de niveau intermédiaire implique des coûts: temps du chercheur et de l'exploitant agricole et de l'argent.

PROBLÈMES DE MODÉLISATION

Carte d'utilisation de la terre

La carte d'utilisation de la terre a été basée sur l'adaptabilité des cultures. Ceci signifie que les cultures ayant des exigences élevées ont été assignées aux meilleurs endroits et que les cultures avec de moindres exigences ont été utilisées pour remplir les cellules restantes du quadrillage. Cette situation idéale peut différer considérablement de la réalité en raison des facteurs socioéconomiques, démographiques et politiques. Bien qu'une carte basée sur la télédétection soit meilleure, de telles cartes sont souvent indisponibles. Là où elles sont disponibles, la classification des images est difficile et souvent subjective. De plus, il est nécessaire d'exécuter beaucoup de contrôles au champ (vérité terrain) afin de s'assurer que la carte d'utilisation de la terre est précise et fiable. La distribution régionale des cultures est plus importante que l'exactitude de la cellule individuelle du quadrillage, et ce, en raison de l'agrégation nécessaire des cellules du quadrillage avant de présenter les résultats finaux. La qualité de la carte d'utilisation de la terre dépend de la qualité des données entrées, qualité qui varie considérablement

d'un pays à l'autre. Les nouvelles initiatives, telles que Africover (http://www.africover.org), offrent des solutions de rechange pour la carte de couverture de terre, qui est l'entrée la plus importante. La base de données universelle de couverture de terre est basée sur de meilleures images satellitaires plus récentes; elle a été vérifiée complètement au champ et a une légende plus spécifique. Cependant, elle n'était pas disponible pour la présente étude.

La carte d'utilisation de la terre comprend un quadrillage de 5 km afin d'éviter les grandes unités de terrain, qui apparaîtraient autrement dans des secteurs ayant peu de variations d'altitude, de climat, de couverture de terre et de sols. Ceci signifie que la plus grande unité de terre possible couvrait 2 500 ha. Cette approche ne peut pas très bien simuler les systèmes de culture multiples car une seule culture peut être assignée à chaque unité de terre. Cependant, l'agrégation des résultats finaux donne une moyenne pour les systèmes de culture multiples. Les cultures avec de plus petites surfaces récoltées pourraient ne pas recevoir une distribution appropriée en raison de la taille probablement trop grande du quadrillage de l'unité de terrain. Alors que l'utilisation d'une résolution plus élevée, par exemple 1 kilomètre, peut améliorer la distribution, ceci pourrait rendre le temps de calcul trop long en raison des grandes bases de données. Un autre problème apparaît pour des pays ayant une variation importante de la topographie, tel que le Kenya. Les bases de données globales décrivant le climat et les saisons de culture sont trop approximatives pour un tel pays. La distribution spatiale de l'utilisation de la terre pour le Kenya ne suit pas la bordure orientale mais coïncide exactement avec la carte des précipitations et des périodes de croissance. De plus, la pomme de terre est indiquée comme poussant à des altitudes trop basses dans ce secteur parce que les données de température ont été interpolées sans tenir compte de l'altitude.

Modélisation de l'érosion

Les résultats de la modélisation de l'érosion avec le modèle LAPSUS exigent une interprétation soigneuse. Le modèle a été développé au niveau d'un bassin versant et est maintenant employé au niveau national. La résolution spatiale utilisée pour cette étude était de 1 kilomètre, alors que la résolution originale des MNT était de 25 m. Ceci a eu comme conséquence une représentation incorrecte de la topographie à l'échelle du bassin versant en raison du nivellement des reliefs tels que les petites vallées. Un quadrillage de 1 km est représentatif à l'échelle du paysage au niveau national et continental. D'autres processus, tels que le creusement des rivières, deviennent plus importants à ce niveau plus élevé d'échelle, alors que des processus tels que la re-sédimentation ou l'érosion due au labour sont perdus au niveau global (Okoth, 2003). Néanmoins, les résultats étaient prometteurs et les phénomènes d'érosion-sédimentation ont été simulés correctement, selon les observations faites au champ. Un problème est la vérification des résultats au niveau national. Au niveau d'un bassin versant, on peut essayer de mesurer l'érosion pour la zone entière, entreprise difficile en soi. Mais il est impossible de mesurer l'érosion à un niveau national, on peut seulement rassembler autant de données que possible et faire une estimation pour tout le pays. Ceci signifie que,

jusqu'à présent, la seule manière de vérifier le modèle a été par la connaissance des experts.

La profondeur de sol et le facteur d'érodibilité du sol (facteur K) sont tirés d'estimations et d'une rare littérature. Bien que ce ne soit pas une variable mesurable, le facteur K est employé comme paramètre d'étalonnage. Par conséquent, la valeur absolue du facteur K est plutôt subjective. Cependant, la différence relative entre chaque type de sol est l'aspect le plus important. La gestion est l'un des principaux facteurs affectant l'érosion sur une terre agricole. Cependant, il n'est pas possible d'incorporer ce facteur à ce niveau global parce que chaque utilisation de la terre est traitée de la même façon pour tout le pays.

En raison des considérations ci-dessus, les cellules du quadrillage devraient être agrégées à une plus grande taille de cellules, par exemple 10 kilomètres. Le modèle ne peut pas prévoir exactement l'importance de l'érosion dans une cellule spécifique du quadrillage, mais il peut fournir une bonne évaluation à l'échelle régionale. Néanmoins, c'est actuellement le modèle le plus utile pour des estimations quantitatives d'érosion à l'échelle nationale et régionale. Le modèle détermine l'érosion et la sédimentation à l'échelle du paysage et simule les phénomènes d'écoulement naturel. Le caractère dynamique du modèle génère une approche plus réaliste de l'érosion et de la sédimentation. Il est nécessaire de conduire une recherche approfondie afin d'améliorer la vérification de ces modèles et il faut apporter une plus grande attention aux discussions par rapport au niveau d'échelle.

Calculs des bilans d'éléments nutritifs

Cette étude a employé le programme Microsoft Access pour calculer le bilan des éléments nutritifs au niveau global et le programme ArcView pour créer les cartes. Un programme de base de données est le plus approprié pour manipuler de grandes quantités de données différentes et effectuer des calculs simples. Microsoft Access a une option pour créer des formes d'entrée faciles à utiliser et est également largement disponible pour de futurs utilisateurs dans les pays en développement. Cependant, l'utilisation de Microsoft Access a quelques inconvénients. Sa structure de base de données signifie qu'elle traite tous les quadrillages de la même manière. Aussi est-il difficile de faire des exceptions. Microsoft Access n'est pas assez puissant pour des pays ayant beaucoup de cellules de quadrillage différentes parce que le programme a une capacité de traitement limitée. Dans cette étude, il n'a pas été possible d'automatiser entièrement le processus parce que des requêtes ont dû être converties en tableaux pour l'addition finale de tous les flux.

L'étude a employé le programme Microsoft Excel pour les calculs au niveau détaillé et au niveau intermédiaire, du fait que: a/ le calcul n'a pas impliqué une grande quantité de données et b/ il était nécessaire de faire plus d'exceptions pour la gestion spécifique des cultures. La gestion est beaucoup plus importante au niveau détaillé et au niveau intermédiaire, ce qui a pour conséquence de nombreuses exceptions. Par conséquent, une entrée manuelle est plus adaptée car cela facilite les petites adaptations. Un inconvénient des feuilles de calcul est la gestion des

données; la vue d'ensemble est facilement perdue quand beaucoup de données sont impliquées. Les programmes de base de données sont plus faciles pour la gestion des données et aident à réduire le nombre d'erreurs qui sont introduites.

INSUFFISANCES ET RESTRICTIONS

Les 17 et 18 février 2003, un atelier a eu lieu à Nairobi. Cet atelier a rassemblé un groupe d'experts en matière de fertilité du sol et des personnes intéressées du niveau intermédiaire pour discuter les résultats de cette étude. Les objectifs étaient: a/ de passer conjointement en revue l'étude, b/ de partager leurs expériences aux niveaux global, intermédiaire et détaillé; et c/ de tirer des conclusions sur l'adaptation de l'approche pour le programme normatif de la FAO. Vingt-six participants travaillant en petits groupes ont examiné l'étude à chaque niveau d'échelle et ont présenté des recherches en rapport. L'opinion générale de l'atelier a été que le bilan des éléments nutritifs est un outil utile pour des utilisateurs spécifiques aux différents niveaux d'échelle. Les paragraphes suivants fournissent plus de détail sur les commentaires et les recommandations spécifiques qui ont émergé de l'atelier.

Validation

Un point important a été abordé à l'atelier concernant le manque de validation suffisante et les incertitudes élevées des différents flux d'éléments nutritifs. Il est difficile de valider les études à grande échelle, exigeantes en données en raison des grandes surfaces et des grandes quantités de données différentes mises en jeu. Ceci rend la validation au champ très difficile et onéreuse. Au niveau global, il n'est pas possible de valider tous les flux d'éléments nutritifs parce que ceci exigerait un nombre important d'échantillons. Il serait possible de valider chaque flux d'éléments nutritifs au niveau détaillé, mais ces validations auraient besoin d'un changement d'échelle jusqu'au niveau intermédiaire et ensuite au niveau global. D'autres études à grande échelle dans le contexte du changement climatique et de la recherche en biodiversité ont de semblables problèmes de validation. Bien que les expérimentations soient une manière relativement simple de valider certains flux d'éléments nutritifs, tels que la lixiviation, d'autres flux, comme l'érosion ou l'application d'engrais minéral sont beaucoup plus difficiles à valider. Comme il est pratiquement impossible de valider le bilan total des éléments nutritifs, on peut choisir de valider seulement les flux spécifiques qui sont considérés comme les plus importants. Par exemple, l'érosion au champ peut être mesurée quand c'est l'une des pertes principales selon le bilan des éléments nutritifs. Ces observations et mesures au champ devraient être effectuées selon un schéma d'échantillonnage adapté. Relier les validations de la recherche sur les processus, par exemple l'étude des pertes de N_2O, à la recherche sur les systèmes, telle que cette étude, est pratique et faisable.

Lacunes

Bien que le bilan des éléments nutritifs inclut les flux les plus importants, il ne tient pas compte de certains aspects. Au niveau global, il n'incorpore pas de processus à grande échelle tels que le brûlis des forêts et le transport de sédiments par les fleuves dans leur bassin. Au niveau du cheptel, il inclut l'urine bien que son contenu en éléments nutritifs soit tout à fait différent de celui du fumier. De plus, les pertes d'éléments nutritifs par l'urine sont très élevées en raison de la lixiviation et de la volatilisation. Certains autres aspects, bien que pas directement liés au bilan des éléments nutritifs, peuvent être importants pour le fonctionnement de l'agroécosystème dans sa totalité. Par exemple, la biodiversité de la couche superficielle du sol a un effet direct sur la structure du sol et la libération des éléments nutritifs de la matière organique. Des effets hors site, tels que la sédimentation dans les réservoirs et la lixiviation excessive de nitrates vers les eaux souterraines, peuvent également être liés au bilan des éléments nutritifs. Selon la définition du système, les importations et les exportations transnationales de produits peuvent être des flux importants dans le bilan des éléments nutritifs, par exemple l'exportation des produits des cultures de rente et l'importation des engrais. Les éléments de la dynamique économique, tels que le retrait des subventions ou les effets de la libéralisation du commerce, alimentent le contexte important qui doit être connu avant de suggérer n'importe quelle gestion améliorée des éléments nutritifs. En conclusion, il peut être nécessaire d'étudier / de suivre des éléments nutritifs autres que N, P et K, tels que le calcium et le soufre, ou le carbone organique, pour s'associer avec des groupes de recherche sur la séquestration du carbone.

Problèmes spécifiques pour chaque niveau d'échelle

Dans des calculs de bilan d'éléments nutritifs, chaque niveau d'échelle a ses propres problèmes spécifiques. Au niveau général, les problèmes les plus importants sont: qualité des données, interprétation des cartes, différences de résolution et vérité terrain. Des contrôles intensifs sur le terrain selon un schéma d'échantillonnage adapté peuvent fournir une solution partielle. Les propriétés des sols et les stocks d'éléments nutritifs pourraient également être collectés grâce à de nouvelles techniques pour l'évaluation rapide par réflectométrie (Shepherd et Walsh, 2002). Au niveau intermédiaire, les problèmes principaux sont: manque de données spatiales, prise en compte de différents systèmes de gestion et absence des facteurs explicatifs socio-économiques, par exemple facilités de crédit et commercialisation. Les données spatiales seront de plus en plus disponibles à l'avenir. Une image satellitaire classifiée et un MNT amélioreront de manière significative le bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire. Au niveau détaillé, beaucoup de recherches ont déjà été réalisées. La boîte à outils NUTMON est une application utile, qui inclut également une partie monétaire (www.nutmon.org). Les questions à ce niveau sont: comment traiter la diversité entre et dans les exploitations agricoles; comment incorporer les techniques de

gestion intégrée de la nutrition (Integrated Nutrition Management: INM) et de gestion intégrée de la fertilité du sol (Integrated Soil Fertility Management ISFM); et comment extrapoler les résultats. Les options possibles sont: stratification dans les méthodes d'échantillonnage, techniques d'INM dans les écoles d'agriculture au champ, et utilisation des SIG pour l'extrapolation.

Présentation des résultats

Les résultats des modèles exprimés en termes de kilogrammes d'éléments nutritifs par hectare ne signifient pas grand chose pour les décideurs. Ils préfèrent des résultats exprimés en termes de perte de rendement ou en valeur monétaire. Le bilan des éléments nutritifs devrait avoir des liens avec d'autres outils et données afin de le rendre plus utile. La combinaison d'un modèle simple «fertilité du sol / production des cultures», tel que l'évaluation quantitative de la fertilité des sols tropicaux (QUantitative Evaluation of the Fertility of Tropical Soils = QUEFTS) (Janssen *et al.*, 1990), avec le bilan des éléments nutritifs permet d'exprimer la diminution des éléments nutritifs en terme de pertes de rendement. D'autres indicateurs intéressants à attacher probablement aux flux d'éléments nutritifs et aux bilans sont la valeur nutritive des régimes alimentaires, les besoins de nourriture et d'argent, et des indicateurs d'équité. Les autres options sont d'utiliser des systèmes d'aide à la décision et des études de scénario. Une façon de rendre le modèle de bilan des éléments nutritifs plus interactif est de le lier à un modèle du type «Conversion de l'utilisation de la terre et ses effets» (= conversion of land use and its effects, CLUE) (Veldkamp et Fresco, 1996), qui simule des changements d'utilisation de la terre et leurs effets. Il est également possible de combiner les résultats avec d'autres données de SIG, telles que des cartes de sécurité alimentaire ou de pauvreté.

Utilité pour les décideurs politiques

Il est important que les décideurs politiques se rendent compte de toutes les lacunes existant dans le bilan des éléments nutritifs, afin qu'ils connaissent ce que sont les limitations de ce modèle de bilan. Ceci soulève la question de savoir si les résultats actuels peuvent servir d'outils aux décideurs ou si une recherche complémentaire est nécessaire. Le modèle de bilan des éléments nutritifs s'est avéré être un indicateur utile pour les décideurs politiques avertis, mais les résultats présentés jusqu'ici n'offrent aucun point d'entrée pour une intervention. Le modèle suscite une prise de conscience des problèmes de fertilité du sol, indique des zones où les éléments nutritifs sont en voie d'épuisement ou d'accumulation, et donne une image quantifiée des flux d'éléments nutritifs au niveau général. Au niveau intermédiaire, il est possible: a/ d'identifier des contraintes spécifiques, b/ d'utiliser les flux d'éléments nutritifs quantifiés pour la planification et c/ d'extrapoler les résultats à d'autres secteurs semblables. En outre, les résultats pourraient convaincre les décideurs politiques de faire des plans d'action pour améliorer la fertilité du sol.

IMPACT

Toute évaluation de l'impact d'un bilan déficitaire des éléments nutritifs doit considérer la fertilité réelle du sol, c'est à dire les stocks d'éléments nutritifs. Un bilan des éléments nutritifs déficitaire sur un sol riche n'affectera pas le rendement à court terme, alors que le rendement de la culture sur un sol pauvre peut diminuer tous les ans en raison de l'épuisement des éléments nutritifs. À un certain niveau, un bilan déficitaire des éléments nutritifs peut ne plus affecter la production dans des zones marginales. Ceci peut être le cas quand les rendements atteignent un niveau plancher et que les entrées naturelles telles qu'IN3 compensent toutes les pertes minimales.

Les diminutions de rendement et de stock de N sont les plus significatives dans les premières décennies et ensuite elles commencent à se stabiliser. La figure 30 montre que, sur un sol riche, les rendements restent inchangés pendant un temps beaucoup plus long. Par conséquent, on pourrait dire que l'épuisement des éléments nutritifs ne se manifeste pas souvent clairement, mais les problèmes sont susceptibles de se produire pour les «futures générations» de la définition de Brundtland (Brundtland, 1987).

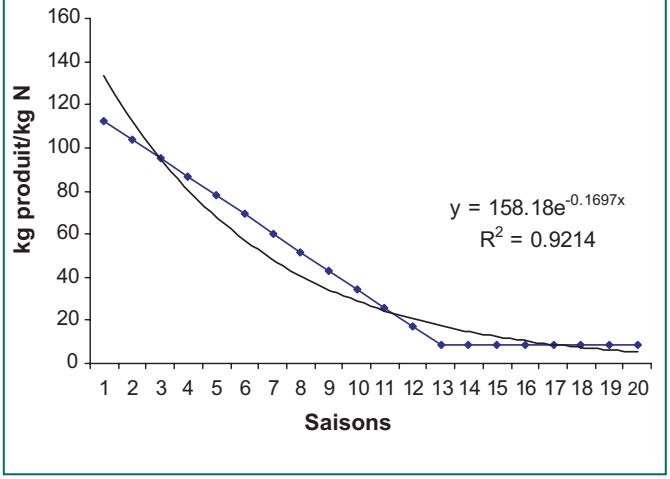
Dans cet exemple, le déclin du rendement est lié à la diminution du stock d'azote. Pour une meilleure simulation, un modèle de croissance de la culture devrait être lié à un modèle d'épuisement des éléments nutritifs. QUEFTS peut convenir car il est relativement simple d'emploi et tient compte de l'interaction entre N, P et K.

Il est également possible d'exprimer en termes économiques des diminutions de rendement et de stock d'éléments nutritifs. Dans ce cas-là, le déclin de rendement est un coût privé (exploitant agricole), tandis que la diminution du stock d'éléments nutritifs est un coût social. Dans cette étude, les stocks d'éléments nutritifs (annexe 6) ont été estimés à partir de bases de données des années 1970s et 1980s. Ceci pourrait impliquer que les stocks réels actuels sont probablement inférieurs. Les exploitants agricoles ajustent normalement leur gestion quand ils observent une diminution de rendement. Quand ils n'ont pas les moyens d'augmenter l'utilisation d'engrais ou de fumier, ils peuvent essayer de faire une meilleure utilisation des technologies peu coûteuses de gestion intégrée de la nutrition (par exemple systèmes mixtes arbre-culture, engrais verts, phosphate naturel, conservation du sol et de l'eau, gestion de niche, tirant bénéfice de la microvariabilité du sol).

L'épuisement du stock naturel d'azote d'un sol entraîne une diminution dans l'efficacité de l'utilisation des engrais. Alors que l'épuisement de N augmente avec le temps, l'application d'engrais azoté doit augmenter pour maintenir les rendements, c.-à-d. le rapport «kilogramme d'engrais azoté ajouté sur kg de production» augmente. On suppose que le coût d'opportunité de diminuer la productivité des engrais avec le temps représente la valeur de la diminution de l'azote du sol.

Un modèle dynamique a été employé pour estimer les coûts de l'épuisement des éléments nutritifs. Le modèle a été relié à un modèle biophysique qui simulait

FIGURE 30
Perte de productivité de l'engrais sur le maïs au Kenya



les effets des changements de bilans d'éléments nutritifs des systèmes de production du Ghana (2), de Tanzanie et du Mali.

Les stocks saisonniers de N dans les sols ont été employés pour estimer les changements de rendement au cours du temps, les rendements étant une variable dépendant de la disponibilité de l'azote (figure 30). Quand les exportations d'azote sont devenues équivalentes aux entrées de N, on a assumé que les rendements se stabilisent (à un niveau bas) pour les saisons restant dans la période de 20 ans. La diminution de l'efficacité d'utilisation de l'engrais spécifique de la culture et de l'emplacement a été estimée en utilisant une fonction d'e-log, c.-à-d. PEA = b × e^{-t} où PEA = Productivité de l'engrais azoté et t = temps. L'intégrale de la fonction sur 20 ans a estimé la diminution de l'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté comme résultat de l'exportation de l'azote du sol:

$$PEA_{perte} = \sum_{t=0}^{t=20} b \times e^{-t}$$

Les coûts ont été calculés pour chaque culture dans chaque système de production et exprimés par hectare de culture. Ces coûts ont été ajustés à la surface cultivée dans le système de production pour arriver à un coût «pondéré». Le coût total de l'épuisement de N a été calculé en additionnant deux composants: le coût d'opportunité des pertes de production dues aux diminutions de rendement, les rendements potentiels étant sensés augmenter de un pour cent par an, et les coûts de l'impact permanent de la productivité réduite de l'engrais azoté dans chaque système de production en tant qu'approximation pour la diminution des stocks d'azote du sol (tableau 47). Les valeurs nettes par hectare de «système de production» ont été diminuées de 10 pour cent par an.

Le résultat suggère que le coût de la productivité de l'engrais azoté est plus élevé que le coût de la réduction de rendement dans les systèmes de culture d'Embu et de Koutiala. Le coût d'opportunité des pertes de production dues aux diminutions de rendement constitue un revenu agricole; la diminution de la productivité d'utilisation des engrais est un coût de production directement supporté par les exploitants. Prendre en compte la capacité d'échange des éléments nutritifs des sols protégera non seulement les revenus futurs des exploitants agricoles, mais

TABLEAU 47
Coût et bénéfices de l'épuisement des éléments nutritifs ($E.U./ha)

	Nkawie Ghana	Wasa Amenfi Ghana	Embu Kenya	Koutiala Mali
Pertes de rendement	224	592	490	28
Réduction de la capacité d'échange de N du sol	79	43	1035	39
Coût total	303	635	1 525	67
Bénéfices	1 909	3 351	2 849	49
Bénéfices / Coût	6,3	5,3	1,9	0,7

cela empêchera également l'effet défavorable sur la compétitivité des systèmes de production provoqué par un coût plus élevé de la fertilisation. Ce dernier point est particulièrement important pour des exploitants fonctionnant sur un marché mondial de plus en plus intégré. Le coût de la prise en charge de la diminution de la fertilité du sol constitue une intervention intéressante dans les zones au Ghana et au Kenya et à un moindre degré au Mali. Le coût mis en jeu peut varier entre 70 $E.U./ha au Mali et 1 500 $E.U./ha au Kenya, avec une part possible à financer par les exploitants agricoles entre 10 et 70 pour cent.

Bibliographie

Abdullahi, Y.A., Hekstra, P., Ibrahim, M.A., Ickowicz, A.E., Pleumpanya, S. & Wickstead, M.R. 1986. *The farming system in the coffee area, Kyeni South Location, Embu District, Kenya.* Wageningen, The Netherlands, ICRA (IAC).

Adu, S.V. 1992. *Soils of the Kumasi region, Ashanti Region, Ghana.* Memoir No. 8. Kumasi, Ghana, Soil Research Institute.

Aggarwal, R.K. et al. 1987. Nature and distribution of fixed ammonium and acid-hydrolysable N in some soil in arid zone. *Trop. Ag.*, 64: 27-32.

Appiah, M.R., Ofori-Frimpong, K., Afrifa, A.A. & Asante, E.G. 1997b. The prospects of fertilizer use in the Cocoa Industry in Ghana. *Proc. Ghana Soil Sci.* 15: 215-221.

Appiah, M.R., Sackey, S.T., Ofori-Frimpong, K. & Afrifa, A.A. 1997a. The consequences of cocoa production on soil fertility in Ghana: a review. *Ghana J. Ag. Sci.*, 30: 183-190.

Asante, E.G. 1997. The contribution of a crop-based economy to Ghana's effective governance and development. *In* A.E. Ikpi & J.K. Olayemi, eds. *Governance and development in West Africa. Perspectives for the 21st Century*, pp. 184-205. Winrock International.

Bah, A.S. 1992. *Les problèmes d'érosion hydrique et les stratégies de mise en valeur des sols au Mali-Sud: étude de cas d'une zone libérée d'onchocercose, le terroir de Fonsebougou.* Université Michel de Montaigne de Bordeaux III. (Ph.D. thesis)

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.

Barry, M.A. 1998. La filière cotonnière est la clé du développement du Mali. Entretien accordé par Drissa Keita, Président Directeur Général de la CMDT à Jeune Afrique Economie (Nr. 1265). *Cot. Dév.*, 26: 25-27.

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.

Baudet, G.J.R., Yoboue, V. & Lacaux, J.P. 1989. *Etude des apports humides de certains éléments chimiques dans la foret dense de Cote d'Ivoire.*

Bindraban, P.S., Stoorvogel, J.J., Jansen, D.M., Vlaming, J. & Groot, J.J.R. 2000. *Land quality indicators for sustainable land management: proposed method for yield gap and soil nutrient balance. Ag., Ecosys. Env.*, 81: 103-112.

Bitchibaly, K., Keita, B., Vlot, J., Dioni, L. & Diarra, Z. 1995. *Sols et toposéquences dans le cercle de Koutiala.* Rapport de synthèse III.

Bosma, R., Bengaly, K., Traoré, M. & Roeleveld, A. 1996. *L'élevage en voie d'intensification. Synthèse de la recherche sur les ruminants dans les exploitations*

agricoles mixtes au Mali-Sud. Amsterdam, The Netherlands, Institut Royal des Tropiques, Bamako, Institut d'Economie Rurale.

Bronson, K.F., Neue, H.U., Singh, U. & Abao, E.B. 1997a. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: 1. Residue, nitrogen and water management. *Soil Sci. Soc. Am.*, 61: 981-987.

Bronson, K.F., Neue, H.U., Singh, U. & Abao, E.B. 1997b. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: 2. Fallow period emissions. *Soil Sci. Soc. Am*., 61: 988-993.

Bruijnzeel, L.A. 1990. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review* Faculty of earth sciences. Amsterdam, The Netherlands, Free University.

Brundtland, G.H. 1987. *Our common future.* World Commission on Environment and Development. Oxford, UK, Oxford University Press.

Budelman, A. & Defoer, T. 2000. Managing soil fertility in the tropics - PLAR and resource flow analysis in practice. Case studies from Benin, Ethiopia, Kenya, Mali and Tanzania. Amsterdam, The Netherlands, Royal Tropical Institute.

Buresh, R.J., Sanchez, P.A., Calhoun, F., Hatfield, J. & Bigham, J.M., eds. 1997. *Replenishing soil fertility in Africa.* Proceedings of an international symposium held at the 88th annual meeting of the American Society of Agronomy and the Soil Science Society of America, Indianapolis, Indiana, 6 November 1996. Soil Science Society of America Special Publication Series 51.

Camara, O.S. 1996. *Utilisation des résidus de récolte et du fumier dans le Cercle de Koutiala: Bilan des éléments nutritifs et analyse économique.* Rapport PSS No. 18. Wageningen, The Netherlands, AB-DLO.

Cardenas, L., Rondon, A., Johansson, C. & Sanhueza, E. 1993. Effects of soil moisture, temperature, and inorganic nitrogen on nitric oxide emissions from acidic tropical savannah soils. *J. Geophys. Res.*, 98: 14783-14790.

Chabalier, P.F. 1984. Etude comparative de deux engrais azotés marqués par ^{15}N: urée et nitrate, sur une culture de maïs en Cote d'Ivoire. *L'Agron. Trop*., 40(2): 107-114.

Charreau, C. 1972. Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *L'Agron. Trop*., 27(9): 905-929.

Cisse, L. 1986. *Etude des effets d'apports de matière organique sur les bilans hydriques et minéraux et la production du mil et de l'arachide sur un sol sableux dégradé du Centre-Nord du Sénégal.* Lorraine, France, Institut National Polytechnique de Lorraine. (thesis)

CMDT. 1999. *Rapport annuel de la CMDT. Campagne 1997/98.*

CMDT. 2000. *Expérience de maintien du potentiel productif en zone CMDT.*

CMDT/SE. 1998. *Annuaire statistique 1997/98. Résultats de l'enquête agricole permanente.*

CMDT/SE. 1999. *Annuaire statistique 1998/99. Résultats de l'enquête agricole permanente.*

CMDT/SE. 2000. *Annuaire statistique 1999/2000. Résultats de l'enquête agricole permanente.*

Cocoa Research Institute Ghana (CRIG). 2001. *Cocoa Research Institute Ghana, annual report 1998/99. Tafo, Ghana.*

Corbett, J.D. & White, J.W. 1998. *Using the sub-annual climate models for meso-resolution spatial analyses*. Temple, USA, Mud Springs Geographers, Inc.

Crill, P., Keller, M., Weitz, A., Grauel, B. & Veldkamp, E. 2000. Intensive field measurements of nitrous oxide emissions from a tropical agricultural soil. *Glob. Bio. Cyc.*, 14: 85-96.

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., De Groote, H., Hilhorst, T., Kanté, S. & Budelman, A. 1998. Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali: a fruitful marriage? *Ag., Ecosys. Env.*, 71: 215-228.

Dembélé, I. 1994. *Production et utilisation de la fumure organique: fiche synthétique d'information.* Document NE94/19. Sikasso, Mali, ESPGRN.

Dhyani, B.P. & Mishra, B. 1992. Effect of nitrogen-application schedule on ammonia volatilization from field of rice (*Oryza sativa*). *Ind. J. Ag. Sci.*, 62: 73-73.

Döll, P. & Siebert, S. 2000. A digital global map of irrigated areas. *ICID Journal*, 49(2), 55-66.

Donkor, M.A., Henderson, C.P. & Jones, A.P. 1991. *Survey to quantify adoption of CRIG recommendations*. F.S.U. Research Paper 3. Ghana, Cocoa Research Institute of Ghana.

Drees, L.R., Manu, A. & Wilding, L.P. 1993. Characteristics of Aeolian dusts in Niger, West Africa. *Geoderma*, 59: 213-233.

Dumanski, J., Terry, E., Byerlee, D. & Pieri, C. 1998. *Performance indicators for sustainable agriculture*. Discussion Note. Washington, DC, The World Bank.

Eyasu, E. 1998. *Is soil fertility declining? Perspectives on environmental change in southern Ethiopia*. Managing Africa's Soils: 2. London, Drylands Programme IIED.

Fan, M.X., Mackenzie, A.F. & Blenkhorn, H.D. 1996. A modified urea based NP fertilizer: urea-TSP-MAP combinations. *Fert. Res.*, 45(3): 217-220.

FAO. 1976. *A framework for land evaluation.* Soils Bulletin No. 32. Rome.

FAO. 1980. *Improving soil fertility through organic recycling - comparative analyses of organic manures*, by R.V. Misra & P.R. Hesse. Project field document No. 24. Rome.

FAO. 1984. *Erosion and soil productivity: a review*, by M. Stocking. AGLS Consultants' Working Paper No. 1. Rome.

FAO. 1986. *The cost of soil erosion in Zimbabwe in terms of the loss of three major nutrient,* by M. Stocking. AGLS Consultants' Working Paper No. 3. Rome.

FAO. 1997. *Livestock & the environment, finding a balance*, by C. De Haan, H. Steinfeld & H. Blackburn. Rome.

FAO. 1998a. *ECOCROP 1 & 2 - The crop environmental requirements database and the crop environment response database.* Land and Water Digital Media Series No 4. Rome.

FAO. 1998b *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. 2001a. *Livestock geography: new perspectives on global resources.* Rome.

FAO. 2001b *Global farming systems study: challenges and priorities to 2030. Synthesis and global overview,* by J. Dixon, A. Gulliver & D. Gibbon. Rome.

FAO. 2002. *Experiences on land degradation and its mitigation and best management practices under semi-arid conditions in Sub-Saharan Africa*, by W.J. Veldkamp Working Paper. Rome.

FAO/UNESCO. 2003. *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.

Fernandez-Rivera, S., Williams, T.O., Hiernaux, P. & Powell, J.M. 1995. *Faecal excretion by ruminants and manure availability for crop production in semi-arid West Africa. In* J.M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T.O. Williams & C. Renard, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa.* Volume II: Technical Papers. Addis Ababa, International Livestock Centre for Africa (ILCA).

Foster, G.R. & Meyer, L.D. 1972. A closed-form soil erosion equation for upland areas. *In* H.W. Shen, ed. *Sedimentation: symposium to honour professor H.A. Einstein,* pp. 12.1-12.19. Fort Collins, USA, Colorado State University.

Foster, G.R. & Meyer, L.D. 1975. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. *In* Anonymous, ed. *Present and perspective technology for predicting sediment yields and sources.* Proceedings Sediment Yield workshop, Oxford, 1972, pp. 190-207. Washington, DC, Department of Agriculture.

Freney, J.R., Denmead, O.T., Watanabe, I. & Craswell, E.T. 1981. Ammonia and nitrous oxide losses following applications of ammonia sulfate to flooded rice. *Aus. J. Ag. Res.*, 32: 37-45.

Gigou, J. 1986. Bilan des éléments minéraux sous une rotation sorgho-cotonnier en lysimètres. *L'Agron. Trop.*, 41(2): 149-153.

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.

Government of Kenya. 1995. *Economic Review, 1992-1995*. Nairobi.

Government of Kenya. 1998. *Embu District Annual Reports, 1991-1998*. Embu, Kenya.

Government of Kenya. 2001. *District Development Plan, Embu, 1997-2001*. Embu, Kenya.

Hafner, H., Bley, J., Bationo, A., Martin, P. & Marschner, H. 1992. Long-term nitrogen balance for pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) in an acid sandy soil of Niger. *Zeit. Pflanz. Bod.*, 156(2): 169-176.

Hartemink, A.E. 2001. *Soil fertility in the tropics with case studies on plantation crops*. Reading, UK, The University of Reading. (Ph.D. thesis)

Hilhorst, T. & Muchena, F.M. 2000. *Nutrients on the move - Soil fertility dynamics in African farming systems*. London, International Institute for Environment and Development (IIED).

IFA/FAO. 2001. *Global estimates of gaseous emissions of NH_3, NO and N_2O from agricultural land*. Rome.

IFA/IFDC/FAO. 2000. *Fertilizer use by crop*. 4th edition. Rome.

Imbach, A.C., Fassbender, H.W., Borel, R., Beer, J., Bonnemann, A., Beer, J.W. & Imbach-Hermida, A.C. 1989. Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and cacao with poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. IV. Water balances, nutrient inputs and leaching. *Agro. Sys.*, 8(3): 267-287.

Indian Council of Agricultural Research. 1997. *Handbook of agriculture*. New Delhi.

Institute of Statistical, Social and Economic Research (ISSER). 2000. International trade and payments. *In: The state of Ghanaian Economy in 1999*, pp. 58-76.

IPCC. 1997. *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Reference Manual (Volume 3).

Jaetzold, R. & Schmidt, H. 1983. *Farm management handbook of Kenya*. Nairobi, Ministry of Agriculture Kenya.

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.

Jones, M.J. & Bromfield, A.R. 1970. Nitrogen in the rainfall at Samaru, Nigeria. *Nature*, 227: 86.

Kalu, A.E. 1979. The African dust plume: its characteristics and propagation across West Africa in winter. *In: Saharan dust*.

Kanté, S. 2001. *Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud.* Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)

Kariuki, J.N. 1998. *The potential of improving Napier grass under smallholder dairy farmers' conditions in Kenya.* Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)

Kater, L., Dembele, I. & Dicko, I. 2000. *The dynamics of irrigated rice farming in Mali*. Managing Africa's Soils 12. London, Drylands Programme IIED.

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.

Kieft, H., Keita, N. & Van der Heide, A. 1994. *Engrais fertiles? Vers une fertilité durable des terres agricoles au Mali.* Leusden, The Netherlands, ETC.

Kirkby, M.J. 1971. Hillslope process-response models based on the continuity equation. *In* D. Brunsden, ed. *Slopes, forms and processes,* pp. 15-30. UK, Institute of British Geographers.

Kirkby, M.J. 1978. Implications for sediment transport. *In* M.J. Kirkby, ed. *Hillslope hydrology,* pp. 325-363. Chichester, UK, Jon Wiley & Sons.

Kirkby, M.J. 1986. A two-dimensional simulation model for slope and stream evolution. *In* A.D. Abrahams, ed. *Hillslope processes*, pp. 203-222. Winchester, USA, Allen & Unwin Inc.

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.

Langenberg, V.T., Nyamushahu, S., Roijackers, R. & Koelmans, A.A. 2002. *Assessing external nutrient sources for Lake Tanganyika*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University.

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-91-18. November 1991. Laxenburg, Austria, International Institute of Applied Systems Analysis.

Lekasi, J.K., Kimani, S.K., Tanner, J.C. & Harris, P. J. C. 2002. Integrating livestock with soil fertility management. *Farmer's J.,* pp. 7-14.

Lekasi, J.K., Tanner, J.C., Kimani, S.K. & Harris, P.J.C. 2001a. *Managing manure to sustain smallholder livelihoods in the east African highlands*. Nairobi, Kenya Agricultural Research Institute.

Lekasi, J.K., Tanner, J.C., Kimani, S.K. & Harris, P.J.C. 2001b. *Manure management in the Kenya Highlands: practices and potential.* Second edition. Nairobi, Kenya Agricultural Research Institute.

Lynam, J.K., Nandwa, S.M. & Smaling, E.M.A. 1998. Introduction. Nutrient balances as indicators of productivity and sustainability in sub-Saharan African agriculture. Special issue. *Ag. Ecosys. Env.*, 71: 1-4.

Mahmood, T., Tahir, G.R., Malik, K.A. & Shamsi, S.R.A. 1998. Denitrification losses from an irrigated sandy-clay loam under a wheat-maize cropping system receiving different fertilizer treatments. *Biol. Fert. Soils*, 26: 35-42.

Mango, N.A.R. 2002. Adaptation of the zero grazing concept by Luo farmers in Kenya. *Leisa Mag.*, 18(1): 18-19.

Manu, J.E.A. 1973. Cocoa in the Ghana economy. *In: Proceedings of cocoa economic resource conference, 1973, Legon;* pp. 265-276.

Matson, P.A., Billow, C. & Hall, S. 1996. Fertilization practices and soil variations control nitrogen oxide emissions from tropical sugarcane. *J. Geophys. Res.*, 101: 18533-18545.

McKenzie, F.R. & Tainton, N.M. 1993. The effect of sward height on volatilized nitrogen from a dryland *Pennisetum clandestinum* of Hochst. pasture. *Afr. J. Range For. Sci.*, 11(2): 59-60.

McTainsh, G.H. 1980. Harmattan dust deposition in northern Nigeria. *Nature*, 286: 587-588.

McTainsh, G.H. & Walker, P.H. 1982. Nature and distribution of Harmattan dust. *Zeit. Geomorph. N.F.*

Meixner, F.X., Fickinger, T., Marufu, L., Serca, D., Nathaus, F.J., Makina, E., Mukurumbira, L. & Andreae, M.O. 1997. Preliminary results on nitric oxide emissions from a southern African savanna ecosystem. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 48: 123-138.

Meyer, J. & Pampfer, E. 1959. Nitrogen content of rain water collected in the humid central Congo basin. *Nature*, 184: 717-718.

Ministry of Agriculture. 1987. *Fertilizer use recommendation project (Phase 1), Final Report, Annex III, Volume 24, Embu District.* Nairobi.

Ministry of Agriculture. 1997-2001. *Agricultural annual reports Embu District (1997-2001).* Nairobi..

Ministry of Agriculture & Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). 1998. *Post-harvest systems of potato and sweet potato in Kenya - final report.* Nairobi, GTZ.

Moberg, J.P., Esu, I.E. & Malgwi, W.B. 1991. Characteristics and constituent composition of Harmattan dust falling in Northern Nigeria. *Geoderma*, 48: 73-91.

Mogaka, L.M. 1996. An economic evaluation of zero-grazing feeding system for high yielding cows on smallholder farms in Kenya. *In* J. Ndikumana & P. De Leeuw, eds. *Sustainable feed production and utilization of smallholder livestock enterprises in sub-Saharan Africa*. Proceedings of the Second African Feed Resources Network (AFRNET), Harare, Zimbabwe, 6–10 December 1993. Nairobi, AFRNET.

Mosier, A.R. & Delgado, J.A. 1997. Methane and nitrous oxide fluxes in grasslands in western Puerto Rico. *Chemosphere*, 35: 2059-2082.

Mosier, A.R., Kroeze, C., Nevison, C., Oenema, O., Seitzinger, S. & Cleemput, O.V. 1998. Closing the global atmospheric N_2O budget: nitrous oxide emissions through the agricultural nitrogen cycle. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 52: 225-248.

Nyanteng, V.K. 1986. *Riceland in West Africa: distribution, growth and limiting factors*. Occasional Paper 7. Monrovia, WARDA.

Ofori-Frimpong, K. & Rowell, D.L. 1999. The decomposition of cocoa leaves and their effect on phosphorus dynamics in tropical soil. *Eur. J. Soil Sci.*, 50(1): 165-172.

Okoth, P.F. 2003. *A hierarchical method for soil erosion assessment and spatial risk modelling. A case study of Kiambu District in Kenya*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)

Omotoso, T.I. 1975. Amounts of nutrients removed from the soil in harvested Amelonado and F3 Amazon cocoa during a year. *Turrialba*, 25: 425-428.

Onduru, D.D., Gachini, G.N., De Jager, A. & Diop, J.M. 1999. *Participatory research on compost and liquid manure in Kenya*. Managing Africa's Soils: 8. London, Drylands Programme IIED.

Ortiz-Monasterio, J.I., Matson, P.A., Panek, J. & Naylor, R.L. 1996. *Nitrogen fertilizer management: consequences for N_2O and NO emissions in Mexican irrigated wheat, 9th Nitrogen Workshop*, pp. 531-534. Braunschweig, Germany, Technische Universität Braunschweig.

Palma, R.M., Rimolo, M., Saubidet, M.I. & Conti, M.E. 1997. Influence of tillage system on denitrification in maize-cropped soils. *Biol. Fert. Soils*, 25: 142-146.

Patel, S.K. & Mohanty, S.K. 1989. Relative ammonia loss from urea-based fertilizers applied to rice under different hydrological conditions. *Fert. Res.*, 19: 113-119.

Pieri, C. 1985. Bilans minéraux des systèmes de cultures pluviales en zones arides et semi-arides. *L'Agron. Trop.*, 40: 1-20.

Praveen-Kumar & Aggarwal, R. 1988. A modification of Douglas and Bremner method for colorimetric estimation of urea. *Com. Soil Sci. Plant Anal.*, 20: 2171-2176.

Pye, K. 1987. *Aeolian dust and dust deposits*. London, Academic Press Limited.

Richard, C. 1963. Pluviométrie et étude physico-chimique des eaux de pluie - Addis-Abeba. *L'Agron. Trop.,* 1073-1080.

Rondon, A., Johansson, C. & Sanhueza, E. 1993. Emission of nitric oxide from soils and termite nests in a trachypogon savanna of the Orinoco Basin. *J. Atmos. Chem.*, 17: 293-306.

Roose, E. 1981. *Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique occidentale: étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées*. Paris, ORSTOM.

Sanhueza, E., Cardenas, L., Donoso, L. & Santana, M. 1994. Effect of ploughing on CO_2, CO, CH_4, N_2O and NO fluxes from tropical savanna soils. *J. Geophys. Res.*, 99: 16429-16434.

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.

Schlecht, E., Mahler, F., Sangare, M., Susenbeth, A. & Becker, K. 1995. Quantitative and qualitative estimation of nutrient intake and faecal excretion of zebu cattle grazing natural pasture in semi-arid Mali. *In* J.M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T.O. Williams & C. Renard, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa.* Volume II: Technical Papers. Addis Ababa, International Livestock Centre for Africa (ILCA).

Schoorl, J.M. & Veldkamp, A. 2001. Linking land use and landscape process modelling: a case study for the Alora region (south Spain). *Ag., Ecosys. Env.*, 85: 281-292.

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: 1025-1034.*

Schoorl, J.M., Veldkamp, A. & Bouma, J. 2002. Modelling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. *Soil Sci. Soc. Am., 66: 1610-1619.*

Scoones, I. 2001. *Dynamics and diversity - soil fertility and farming livelihoods in Africa*. London, Earthscan Publications Ltd.

Scoones, I. & Toulmin, C. 1999. *Policies for soil fertility management in Africa.* Nottingham, UK, IIED and IDS.

SEP. 1997. *Suivi – Evaluation – Permanent (utilisation de la base de données de l'ESPGRN).* Mali.

SEP. 1998. *Suivi – Evaluation – Permanent (utilisation de la base de données de l'ESPGRN).* Mali.

SEP. 1999. *Suivi – Evaluation – Permanent (utilisation de la base de données de l'ESPGRN).* Mali.

Shepherd, K.D. & Walsh, M.G. 2002. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. *Soil Sci. Soc. Am.*, 66(3): 988-998.

Sissoko, K. 1999. *Et demain l'Agriculture? Options techniques et mesures politiques pour un développement agricole durable en Afrique subsaharienne. Cas du Cercle de Koutiala en zone sud du Mali.* Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (Ph.D. thesis)

Skiba, U., Fowler, D. & Smith, K.A. 1997. Nitric oxide emissions from agricultural soils in temperate and tropical climates: sources, controls and mitigation options. *Nut. Cyc. Agroeco.*, 48: 139-153.

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., Oenema, O. & Fresco, L.O., eds. 1999. *Nutrient disequilibria in agroecosystems - concepts and case studies*. Wallingford, UK, CABI Publishing.

Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J. & De Jager, A. 2002. Decision making on integrated nutrient management through the eyes of the scientist, the land user and the policy maker. *In* B. Vanlauwe, J. Diels, N. Sanginga & R. Merckx, eds. *Integrated plant nutrient management in sub-Saharan Africa: from concept to practice*. Wallingford, UK, CABI Publishing.

Soil Research Institute. 1999. *Ghana soils map and database*. Copenhagen, Ghana Environmental Protection Agency.

Soumaré, B.S. 2001. *Réflexions sur la situation de la filière coton du Mali et propositions de réforme et d'amélioration.*

Staal, S.J. & Shapiro, B.I. 1998. *The effects of price liberalisation on Kenyan peri-urban dairy.* Livestock Policy Analysis Brief 15. Nairobi, ILRI.

Staverman, J. 2003. *Yield determinants of maize, beans, coffee and Napier grass farming on the slopes of mount Kenya*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen University. (M.Sc. thesis)

Stoorvogel, J.J. & Smaling, E.M.A. 1990. *Assessment of soil nutrient depletion in sub-Saharan Africa: 1983-2000*. Report 28. Wageningen, The Netherlands, Winand Staring Centre.

Stoorvogel, J.J., Bonzi, M. & Gicheru, P. 2000. *Spatial variation in nutrient stocks in Sub-Saharan farming systems.* Wageningen, The Netherlands, Wageningen University.

Stoorvogel, J.J., Janssen, B.H. & Van Breemen, N. 1997b. The nutrient budgets of a watershed and its forest ecosystem in the Tai National Park in Cote d'Ivoire. *Biogeochemistry*, 37: 159-172.

Stoorvogel, J.J., Van Breemen, N. & Janssen, B.H. 1997a. The nutrient input by Harmattan dust to a forest ecosystem in Cote d'Ivoire, Africa. *Biogeochemistry*, 37: 145-157.

Suratno, W., Murdiyarso, D. Suratmo, F.G., Anas, I., Saeni, M.S. & Rambe, A. 1998. Nitrous oxide flux from irrigated rice fields in west Java. *Env. Poll.*, 102: 159-166.

Tian, G., Ishida, F., Dick, W.A., Hatfield, J.L. & Kral, D.M., eds. 2001. Sustaining soil fertility in West Africa: Proceedings of a symposium sponsored by Divisions S-4, S-8, and A-6 of the Soil Science Society of America and the American Society of Agronomy. Special Publication Series. *Soil Sci. Soc. Am.,* 58.

Tiessen, H., Hauffe, H.K. & Mermut, A.R. 1991. Deposition of Harmattan dust and its influence on base saturation of soils in northern Ghana. *Geoderma*, 49: 285-299.

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., De Jager, A. & Vlaming, J. 1998a. Monitoring nutrient flows and economic performance in African farming systems (NUTMON). 2. Tool development. *Ag., Ecosys. Env.*, *71: 49-62.*

Van den Bosch, H., Gitari, J.N., Ogaro, V.N., Maobe, S. & Vlaming, J. 1998b. 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: 63-80.

Van der Eijk, J.C. 1995. *Nutrient losses via leaching in Bukoba District, Tanzania*. Wageningen, The Netherlands, Wageningen Agricultural University. (M.Sc. thesis)

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: 253-270.

Veldkamp, E. & Keller, M. 1997. Nitrogen oxide emissions from a banana plantation in the humid tropics. *J. Geophys. Res.*, 102: 15889-15898.

Veldkamp, E., Keller, M. & Nuñez, M. 1998. Effects of pasture management on N_2O and NO emissions from soils in the humid tropics of Costa Rica. *Glob. Biol. Cyc.*, 12: 71-79.

Vescovi, F.D., Duadze, S. & Menz, G. 2002. *Use of remote sensing for land use and natural resources investigations in the Volta Basin.* Bonn, Germany, University of Bonn.

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) - Part 1: Manual for the NUTMON-Toolbox*. Wageningen, The Netherlands, Alterra.

Vlot, J.E. & Traoré, M. 1995. *Etude des toposéquences. Résultats des mesures "physique du sol". Mali, Cercle de Koutiala.*

Watanabe, T., Chairoj, P., Tsuruta, H., Masarngsan, W., Wongwiwatchai, C., Wongrasaid, S., Cholitkul, W. & Minami, K. 2000. Nitrous oxide emissions from fertilized upland fields in Thailand. *Nut. Cyc. Agroeco.,* 57: 55-65.

Weitz, A.M., Keller, M., Linder, E. & Crill, P.M. 1999. Spatial and temporal variability of nitrogen oxide and methane fluxes from a fertilized tree plantation in Costa Rica. *J. Geophys. Res.*, 104: 30097-30107.

Williams, T.O., Powell, J.M. & Fernandez-Rivera, S. 1995. Manure utilisation, drought cycles and herd dynamics in the Sahel: Implications for cropland productivity. *In* J.M. Powell, S. Fernandez-Rivera, T.O. Williams & C. Renard, eds. *Livestock and sustainable nutrient cycling in mixed farming systems of sub-Saharan Africa*. Volume II: Technical Papers. Addis Ababa, International Livestock Centre for Africa (ILCA).

Windmeijer, P.N. & Andriesse, W. 1993. *Inland valleys in West Africa: an agro-ecological characterization of rice-growing environments.* ILRI publication 52. Wageningen, The Netherlands, ILRI.

Wong, M.T.F., Van der Kruijs, A.C.B.M. & Juo, A.S.R. 1992. Leaching loss of calcium, magnesium, potassium and nitrate derived from soil, lime and fertilizers as influenced by urea applied to undisturbed lysimeters in south-east Nigeria. *Fert. Res.,* 31(3): 281-289.

Annexe 1

Teneurs en éléments nutritifs des fumiers (valeurs tirées de la littérature)

Valeurs basées sur la matière fraîche, la matière sèche étant considérée comme représentant 50 pour cent de la matière fraîche

Fumier de bovin	N (pour cent)	P (pour cent)	K (pour cent)	
	0.70	0.30	0.67	Lekasi *et al.*, 2001a
	1,63	0,09	1,13	Smaling *et al.*, 1999
	0,57	0,14		FAO, 1980
	0,64	0,06	0,23	Williams *et al.*, 1995
	0,79	0,22	1,00	Baijukya *et al.*, 1998
	0,29	0,03	0,42	Budelman et Defoer, 2000
	0,70	0,26	0,55	Budelman et Defoer, 2000
Moyenne:	0,76	0,15	0,67	

Fumier de caprin / ovin	N (pour cent)	P (pour cent)	K (pour cent)	
	0,75	0,20	0,69	Lekasi *et al.*, 2001a
	0,75	0,11		FAO, 1980
	0,60	0,22	0,54	Indian Council of Agricultural Research, 1997
	1,10	0,06	0,37	Williams *et al.*, 1995
	0,20	0,10	0,35	Budelman et Defoer, 2000
	0,65	0,20	0,50	Budelman et Defoer, 2000
	1,45	0,53	0,53	Budelman et Defoer, 2000
Moyenne:	0,79	0,20	0,50	

Fiente de volaille	N (pour cent)	P (pour cent)	K (pour cent)	
	0,67	0,30		FAO, 1980
	1,40	0,70	0,71	Indian Council of Agricultural Research, 1997
	0,65	0,40	0,15	Budelman et Defoer, 2000
	1,60	0,15	0,18	Budelman et Defoer, 2000
Moyenne:	1,08	0,39	0,35	

Fumier animal	N (pour cent)	P (pour cent)	K (pour cent)	
	0,56	0,15	0,12	Lekasi *et al.*, 2001b
	0,84	0,12		Eyasu, 1998
	0,70	0,11		Eyasu, 1998
	0,70	0,10		Eyasu, 1998
	0,60	0,10	0,77	Kater *et al.*, 2000
	0,39	0,10	0,63	Onduru *et al.*, 1999
	0,70	0,25	0,55	Van den Bosch *et al.*, 1998a
	0,54	0,09	0,65	Defoer *et al.*, 1998
	0,54	0,16	0,72	Moyenne de Stoorvogel et Smaling, 1990
Moyenne:	0,63	0,13	0,54	

Annexe 2

Valeurs de référence pour le modèle de régression de la lixiviation de K

Le modèle est basé sur 33 expérimentations représentatives et a un R^2 de 0.45

Référence	Pays	Culture	CEC	K engrais	Pluviométrie	K lessivé
			cmol/kg	kg K/ha	mm	kg K/ha
Hafner *et al.*, 1992	Niger	Mil	1,3	0	699	12
Hafner *et al.*, 1992	Niger	Mil	1,3	25	699	10
Van der Eijk, 1995	Tanzanie	Bananiers/haricots	4,6	0	2 000	39
Van der Eijk, 1995	Tanzanie	Bananiers	4,6	273	724	74
Wong *et al.*, 1992	Nigeria	Maïs	2,4	67	2 420	23
Wong *et al.*, 1992	Nigeria	Riz (pluvial)	2,4	42	2 420	9
Wong *et al.*, 1992	Nigeria	Terre nue	2,4	67	2 420	29
Wong *et al.*, 1992	Nigeria	Terre nue	2,4	42	2 420	20
Imbach *et al.*, 1989	Costa Rica	Cacaoyer/poro	-	27	1 923	1
Imbach *et al.*, 1989	Costa Rica	Cacaoyer/laurel	-	27	1 923	1
Gigou, 1986	Cameroun	Sorgho/cotonnier	7,4	62	737	2
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Maïs	8,0	29	633	1
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Maïs	8,0	58	633	1
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Cotonnier	8,0	37	532	1
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Cotonnier	8,0	75	532	1
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Maïs	8,0	29	633	2
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Maïs	8,0	58	633	2
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Cotonnier	8,0	37	532	2
Chabalier, 1984	Côte d'Ivoire	Cotonnier	8,0	75	532	1
Roose, 1981	Côte d'Ivoire	Maïs	8,0	39	2 100	3
Roose, 1981	Côte d'Ivoire	Hévéa	8,1	0	2 100	63
Roose, 1981	Côte d'Ivoire	Savane arborée (brûlée)	6,1	0	1 350	21
Roose, 1981	Côte d'Ivoire	Maïs	6,1	70	1 350	1
Roose, 1981	Burkina Faso	Jachère	2,5	0	860	4
Roose, 1981	Burkina Faso	Sorgho	2,5	50	860	1
Roose, 1981	Burkina Faso	Savane arborée	3,9	0	860	1
Cisse, 1986	Sénégal	Arachide	5,2	34	211	3
Cisse, 1986	Sénégal	Arachide	6,3	34	211	1
Cisse, 1986	Sénégal	Arachide	5,2	34	279	1
Cisse, 1986	Sénégal	Arachide	5,2	34	347	2
Cisse, 1986	Sénégal	Mil	5,2	9	347	1
Cisse, 1986	Sénégal	Mil	6,3	9	347	0
Charreau, 1972	Sénégal	Rotation	-	0	660	7

Annexe 3
Profondeur d'enracinement

Culture	Profondeur d'enracinement (m)*
Agrumes	1,1
Arachide	0,5
Bananier	0,5
Blé	1,0
Cacaoyer	0,7
Caféier	0,9
Canne à sucre	1,2
Céréales, autres	1,0
Cocotier	1,0
Cotonnier	1,0
Fibres	0,8
Fourrage	0,8
Fruitiers, autres	1,0
Hévéa	1,0
Jachère	0,5
Légumes	0,4
Légumineuses	0,6
Maïs	0,9
Manioc	0,6
Mil	1,0
Orge	1,0
Palmier à huile	1,0
Patate douce	1,0
Plantains	0,5
Plantes à racines, autres	0,5
Plantes oléagineuses, autres	1,0
Pomme de terre	0,4
Riz	0,5
Sésame	1,0
Soja	0,6
Sorgho	1,0
Tabac	0,7
Théier	0,9
Tournesol	0,8

* Valeur minimum de la profondeur maximale d'enracinement utilisée pour éviter une surestimation.
Source: FAO,1998b.

Annexe 4
Valeurs de référence pour les pertes gazeuses

Valeurs de référence pour les émissions de NH_3

Référence	Lieu	Culture	Engrais N (kg N/ha)	Émission NH_3 (kg N/ha)	Perte de NH_3 (pour cent d'engrais N)
McKenzie et Tainton, 1993	Afrique du Sud	Prairie	50	1,4	0,027
McKenzie et Tainton, 1993	Afrique du Sud	Prairie	100	3,7	0,037
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	5,8	0,145
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	5,2	0,130
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	3,2	0,080
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	4,4	0,110
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	4,4	0,110
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	2,4	0,060
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	3,2	0,080
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Mil	40	5,5	0,137
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Mil	40	2,3	0,057
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Mil	40	3,6	0,090
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Mil	40	4,1	0,104
Praveen-Kumar et Aggarwal, 1988	Jodhpur, Inde	Mil	40	4,4	0,110
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	18,7	0,187
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	17,9	0,179
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	16,8	0,168
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	15,9	0,159
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	13,4	0,134
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	10,9	0,109
Fan *et al.*, 1996	Dehradun, Inde	Terre nue	100	8,7	0,087
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	24,8	0,248
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	20,3	0,203
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	15,8	0,158
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	11,4	0,114
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	18,9	0,189
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	17,5	0,175
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	13,5	0,135
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	13,2	0,132
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	15,6	0,156
Fan *et al.*, 1996	Delhi, Inde	Terre nue	100	9,8	0,098
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	30	0,5	0,016
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,2	0,014
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,2	0,014
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,3	0,019
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,3	0,020
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,1	0,008

Référence	Lieu	Culture	Engrais N (kg N/ha)	Émission NH_3 (kg N/ha)	Perte de NH_3 (pour cent d'engrais N)
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	15	0,2	0,012
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	60	1,6	0,026
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	60	1,2	0,021
Patel et Mohanty, 1989	Cuttack, Inde	Riz	60	1,8	0,031
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	0	5,6	
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	14,4	0,240
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	9,9	0,164
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	8,3	0,139
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	9,7	0,161
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	12,3	0,204
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	10,0	0,167
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	60	11,3	0,189
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	120	21,5	0,180
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	120	17,4	0,145
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	120	12,5	0,104
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	120	17,2	0,144
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	120	18,9	0,158
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	180	28,4	0,158
Dhyani et Mishra, 1992	Pantnagar, Inde	Terre nue	240	31,2	0,130
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs		0,5	
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs	60	7,4	0,123
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs	60	5,3	0,088
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs		0,5	
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs	60	5,66	0,094
Palma *et al.*, 1997	Buenos Aires, Argentine	Maïs	60	3,74	0,062
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Terre nue	40	3,6	0,090
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Terre nue	80	12,0	0,150
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Terre nue	120	27,6	0,230
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	40	2,6	0,065
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	7,6	0,095
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	120	18,0	0,150
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	12,1	0,151
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	9,3	0,116
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	6,7	0,084
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	2,8	0,035
Aggarwal *et al.*, 1987	Jodhpur, Inde	Prosopis	80	0,8	0,010

Valeurs de référence pour les émissions de N_2O

Référence	Culture	C. Org. (pour cent)	Précipitations (mm)	Engrais N (kg N/ha)	Emission N_2O (kg N/ha)
Ortiz-Monasterio *et al.*, 1996	Blé, irrigué			250	3,2
Ortiz-Monasterio *et al.*, 1996	Blé, irrigué			250	1,5
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	2,8	1 120	0	1,43
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	2,8	1 120	300	11,4
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	3,7	1 930	0	1,38
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	3,7	1 930	300	3,84
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	2,1	1 650	0	1,647
Mosier et Delgado, 1997	Prairie	2,1	1 650	300	4,012
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	1,37
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,44
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,309
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	150	0,938
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,84
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,336
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,497
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	100	1,57
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,903
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	300	5,998
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	0,762
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	300	2,54
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	0	1,03
Mosier *et al.*, 1998	Sorgho	2,1	1 650	100	7,19
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,6	1 250	84	0,011
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	1 125	34	0,11
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		1 125	22	0,013
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	275	45	0,052
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	275	35	0,17
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		275	39	0,092
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		275	20	0,006
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	8	1 100	95	0,38
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	5,6	3 810	124	1,25
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	5,5	3 800	94	0,33
Mahmood *et al.*, 1998	Maïs, irrigué	1,1	340	100	0,16
Mahmood *et al.*, 1998	Blé, irrigué	1,1	340	100	0,49
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	0	2,3
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	0	4,3
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	22,6
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	
Veldkamp et Keller, 1997	Bananier		3 962	360	
Veldkamp et Keller, 1997	Bananier		3 962	360	
Veldkamp et Keller, 1997	Bananier		3 962	360	6,1
Freney *et al.*, 1981	Riz, inondé		40	20	0,0
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	0	0,119
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	62,5	0,196
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	0	0,109
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	62,4	0,289

Référence	Culture	C. Org. (pour cent)	Précipitations (mm)	Engrais N (kg N/ha)	Emission N_2O (kg N/ha)
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	0	0,122
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	75	0,351
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	0	0,1
Watanabe *et al.*, 2000	Maïs		1 150	46,9	0,403
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		0	0,315
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		0	0,425
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,649
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,629
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,905
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,712
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		0	0,306
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		0	0,484
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,749
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	1,092
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	0,859
Suratno *et al.*, 1998	Riz, inondé	2,4		86	1,012
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	1,802
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		200	1,427
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	1,948
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	1,773
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	0,741
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		200	1,04
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	0,835
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	1,097
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	0,452
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		200	0,16
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	0,181
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		120	0,639
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		112	0,831
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		192	0,16
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		112	0,181
Bronson *et al.*, 1997a; b	Riz, inondé	1,7		112	0,526
Weitz *et al.*, 1999	Plantation de Balsa	5,2		65	2,84
Crill *et al.*, 2000	Corn	7,5	3 962	0	0,51
Crill *et al.*, 2000	Corn	7,5	3 962	122	1,83
Crill *et al.*, 2000	Papayer	7,5	3 962	0	0,19
Crill *et al.*, 2000	Papayer	7,5	3 962	133	1,37

Valeurs de référence pour les émissions de NO_x

Référence	Culture	C. Org. (pour cent)	Précipitations (mm)	Engrais N (kg N/ha)	Emission NO_x (kg N/ha)
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,6	1 250	84	0,01
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	1 125	34	0,00
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		1 125	22	0,01
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	275	45	0,01
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	1,5	275	35	0,00
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		275	39	0,01
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre		275	20	0,00
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	8,0	1 100	95	1,95
Matson *et al.*, 1996	Canne à sucre	5,5	3 800	94	0,71
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	0	0,82
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	0	1,13
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	4,64
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	8,38
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	7,48
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	5,41
Veldkamp *et al.*, 1998	Prairie		3 962	300	6,97
Ortiz-Monasterio *et al.*, 1996	Blé, irrigué			250	6,29
Ortiz-Monasterio *et al.*, 1996	Blé, irrigué			250	2,71
Weitz *et al.*, 1999	Plantation d'arbres			65	0,41
Cardenas *et al.*, 1993	Savane	1,0		80	0,14
Cardenas *et al.*, 1993	Savane	1,0		80	0,05
Cardenas *et al.*, 1993	Savane	1,0		0	0,02
Rondon *et al.*, 1993	Savane	0,9	1 300	0	0,01
Rondon *et al.*, 1993	Savane	0,9	1 300	200	0,65
Rondon *et al.*, 1993	Savane	0,9	1 300	200	0,06
Rondon *et al.*, 1993	Savane	2,0	1 300	200	0,29
Veldkamp et Keller, 1997	Bananier		3 962	360	10,70
Meixner *et al.*, 1997	Maïs		846	0	0,34
Meixner *et al.*, 1997	Maïs		846	16	1,10
Sanhueza *et al.*, 1994	Savane	4,0		200	0,01
Sanhueza *et al.*, 1994	Savane	4,0		200	0,20
Sanhueza *et al.*, 1994	Savane	4,0		0	0,00
Skiba *et al.*, 1997	Prairie	1,4		100	0,03
Skiba *et al.*, 1997	Prairie	1,4		100	0,17
Skiba *et al.*, 1997	Prairie	1,4		100	0,14
Skiba *et al.*, 1997	Prairie	1,4		100	0,14

Annexe 5

Procédure pour la modélisation LAPSUS

Les paragraphes suivants décrivent la procédure utilisée dans une étude de la FAO en 2003 pour estimer l'érosion-sédimentation pour le Ghana, le Kenya et le Mali. La modélisation de l'érosion-sédimentation avec LAPSUS a employé cinq cartes d'entrée différentes (fichiers ASCII): MNT, précipitations, infiltration, profondeur du sol et érodibilité du sol (facteur K).

MNT

L'entrée la plus importante a été le Modèle Numérique de Terrain (= Digital Elevation Model: DEM), employé pour dériver les gradients de pente. Ce MNT ne devait pas rencontrer de creux ou de plats (cellules voisines du quadrillage avec exactement la même altitude). Un nouveau MNT sans creux a été créé avec ArcInfo (en employant la commande «remplissage»). Avec un programme spécial (arc_flat.cpp), développé par Schoorl, ce nouveau MNT a éliminé les plats en combinant le MNT sans creux avec une carte des flux et directions. Ce nouveau MNT sans plaines et sans creux a servi d'entrée pour le modèle LAPSUS.

PRÉCIPITATIONS

Pour les précipitations, la modélisation LAPSUS a employé la carte des précipitations de l'IIASA avec une résolution de 0,5 degré (disponible pour la totalité de l'Afrique). Dans le modèle, le facteur d'évaporation a été placé à 0,4 (ce qui signifie que 60 pour cent de toutes les précipitations s'évaporent). Ce facteur pourrait être différent pour chaque pays. La carte de l'IIASA n'a pas été employée pour le Kenya parce qu'elle était trop grossière et contenait des erreurs, par exemple l'effet du Mont Kenya n'était pas visible. Par conséquent, l'étude a employé une carte climatique de Corbett et White (1998). La carte des précipitations de l'IIASA était adaptée aux conditions du Ghana et du Mali parce que ces pays ont une topographie moins tourmentée et un type de précipitations plus régulier.

INFILTRATION

La capacité d'infiltration devrait être connue afin de permettre une bonne évaluation du ruissellement. L'infiltration est liée à la couverture de la terre et à son utilisation. La capacité d'infiltration détermine la part des précipitations qui s'infiltre et la part qui ruisselle. Par conséquent, la carte de couverture des terres

avec la classification du Programme International Géosphère - Biosphère a été reclassifiée en huit classes avec les pourcentages suivants d'infiltration:

- Forêt (1-5) 100 pour cent
- Zones arbustives (6-8) 70 pour cent
- Pâturages (9, 10) 85 pour cent
- Marais permanents (11) 100 pour cent
- Terres agricoles (12, 14) 60 pour cent
- Zones urbaines et bâties (13) 60 pour cent
- Terres nues (16) 20 pour cent
- Eau (17) 100 pour cent

PROFONDEUR DE SOL

La profondeur de sol détermine la capacité de stockage d'eau disponible et est donc importante pour estimer la quantité de ruissellement. Chaque unité de sol a été répartie selon des classes de profondeur de sol. Les classes suivantes ont été distinguées et utilisées pour créer une carte de profondeur de sol:

1. > 1 m 1,2 m
2. 0.4-1 m 0,7 m
3. < 0.4 m 0,25 m
0. Eau 2 m

FACTEUR K

La quantité de ruissellement peut être calculée en utilisant les paramètres d'entrée ci-dessus. L'érodibilité du sol (facteur de décollement) devrait être connue afin d'estimer l'importance de l'érosion. Chaque unité de sol a été triée selon des classes d'érodibilité du sol. Ces classes ont été basées sur le travail de la FAO (2002) et la connaissance des experts. Les classes d'érodibilité du sol ont été rapportées aux facteurs K (ci-dessous) et exportées vers une carte avec un quadrillage.

0. Eau 1×10^{-6}
1. Très faible 1×10^{-5}
2. Faible 2×10^{-5}
3. Moyenne 3×10^{-5}
4. Forte 5×10^{-5}
5. Très forte 1×10^{-4}

SIMULATION

Le temps d'exécution de la simulation selon le modèle LAPSUS a été fixé à un an pour cette étude. Le modèle a produit deux dossiers de résultats: un fichier ASCII avec le ruissellement et un fichier ASCII avec le changement de profil en mètres (érosion-sédimentation nette). Ces dossiers peuvent être importés dans ArcView et être visualisés. D'autres informations sur le modèle LAPSUS sont disponibles dans Schoorl *et al.* (2002) et Schoorl et Veldkamp (2001).

Annexe 6

Caractéristiques du sol - Classification FAO74

FAO74	Unité FAO	Argile %	pH	C. Org. %	N. Tot. %	K éch. cmol/kg	CEC cmol/kg	D. App. kg/dm³	P disp. ppm	Erod.*	Profondeur*
Af	Acrisol ferrique	30,6	5	1,01	0,088	0,22	6,39	1,44	3,3	2	1
Ag	Acrisol gleyique	17,9	4,7	2,16	0,119	0,40	9,56	1,41	1,5	3	2
Ah	Acrisol humique	37,0	4,9	3,32	0,266	0,22	12,95	1,32	8,0	1	1
Ao	Acrisol orthique	21,3	4,9	0,87	0,083	0,21	5,18	1,38	4,0	3	3
Ap	Acrisol plinthique	19,2	4,7	1,34	0,141	0,11	5,11	1,53	4,5	4	1
Bc	Cambisol chromique	23,5	6,9	0,71	0,069	0,78	11,66	1,33	5,5	3	1
Bd	Cambisol dystrique	24,7	5,1	1,27	0,118	0,33	9,32	1,27	5,7	3	1
Be	Cambisol eutrique	23,3	6,7	1,07	0,109	1,86	12,88	1,45	12,6	3	2
Bf	Cambisol ferralique	27,8	5,1	0,88	0,073	0,52	6,64	1,28	2,3	3	1
Bg	Cambisol gleyique	25,9	5,8	0,89	0,078	0,34	12,06	1,5	7,6	3	1
Bh	Cambisol humique	42,1	5,1	5,01	0,402	0,25	16,87	1,15	2,0	1	1
Bk	Cambisol calcique	26,6	8,1	0,76	0,106	0,85	19,79	1,45	4,3	3	1
Bv	Cambisol vertique	40,5	6,9	0,95	0,097	0,83	25,27	1,41	2,0	4	2
Ch	Chernozem haplique	50,0	7,7	2,19	0,260	0,10	35,80	1,42	3,0	1	1
Ck	Chernozem calcique	40,7	8,1	0,89	0,100	1,25	22,61	1,37	3,3	1	1
Cl	Chernozem luvique	27,8	7,6	0,81	0,090	0,68	13,01	1,65	3,1	1	1
E	Rendzines	21,5	7,6	1,59	0,163	0,95	21,88	1,34	17,4	2	3
Fa	Ferralsol acrique	50,1	4,7	1,60	0,094	0,22	7,51	1,12	1,6	3	2
Fh	Ferralsol humique	41,2	4,9	2,99	0,190	0,18	9,96	1,21	7,5	2	1
Fo	Ferralsol orthique	37,0	5	1,44	0,108	0,24	8,33	1,4	4,1	2	2
Fp	Ferralsol plinthique	31,5	4,9	1,29	0,077	0,25	5,83	1,31	4,3	3	3
Fr	Ferralsol rhodique	46,7	5,5	1,31	0,103	0,29	8,57	1,25	4,6	3	2
Fx	Ferralsol xanthique	27,3	4,5	1,00	0,067	0,09	5,62	1,26	4,3	4	2
G	Gleysols	42,3	5,7	1,51	0,151	1,09	20,60	1,38	5,2	2	1
Gc	Gleysol calcarique	50,4	7,5	1,17	0,120	1,55	27,86	1,65	3,1	1	1
Gd	Gleysol dystrique	48,0	5	2,35	0,160	1,10	25,79	1,2	6,5	3	1
Ge	Gleysol eutrique	29,8	6,2	1,35	0,077	0,95	17,84	1,43	4,6	3	1
Gh	Gleysol humique	34,8	5,1	5,18	0,381	0,25	16,38	1,45	4,4	1	1
Gm	Gleysol mollique	48,3	6,6	2,51	0,243	1,58	29,18	1,44	6,6	1	1
Gp	Gleysol plinthique	48,6	5,4	2,58	0,258	1,24	20,60	1,03	3,5	3	2
Hc	Phaeozem calcarique	35,9	7,9	0,99	0,106	0,81	30,83	1,49	21,7	1	1
Hg	Phaeozem gleyique	45,8	6	1,99	0,120	0,79	22,57	1,45	5,6	1	1
Hh	Phaeozem haplique	39,5	6,4	2,42	0,222	1,18	28,12	1,43	21,0	2	1
Hl	Phaeozem luvique	40,2	6,3	1,59	0,129	1,85	27,57	1,48	31,8	2	1
I	Lithosols	32,0	7,7	3,88	0,433	1,10	11,53	1,42	6,0	3	3
J	Fluvisols	31,8	7,5	0,70	0,070	0,77	14,80	1,4	11,3	2	1
Jc	Fluvisol calcarique	25,7	8,1	0,83	0,077	1,29	27,45	1,45	9,2	1	1
Jd	Fluvisol dystrique	36,3	4,8	1,88	0,158	0,18	15,04	1,36	11,6	2	1
Je	Fluvisol eutrique	22,3	7	1,07	0,116	0,63	12,51	1,42	13,7	2	1
Jt	Fluvisol thionique	43,0	4,8	4,11	0,209	0,99	17,92	1,07	12,2	5	1

* Erod. = facteur d'érodibilité (1 = faible; 5 = élevé); Profondeur = classes de profondeur de sol (1 = > 1,0 m; 2 = 0,4-1,0 m; 3 = < 0,4 m)

FAO74	Unité FAO	Argile %	pH	C. Org. %	N. Tot. %	K éch. cmol/kg	CEC cmol/kg	D. App. kg/dm³	P disp. ppm	Erod.*	Profondeur*
L	Luvisols	22,4	6,4	0,56	0,056	0,46	10,50	1,54	3,9	3	1
La	Luvisol albique	5,5	6,4	0,28	0,033	0,18	2,92	1,62	1,8	4	1
Lc	Luvisol chromique	24,9	6,4	0,70	0,094	0,64	12,34	1,53	5,3	3	1
Lf	Luvisol ferrique	21,3	5,9	0,63	0,078	0,40	6,24	1,55	3,0	1	1
Lg	Luvisol gleyique	29,0	6,1	0,66	0,170	0,60	18,02	1,48	2,9	2	1
Lk	Luvisol calcique	17,2	8	0,36	0,076	0,68	10,80	1,57	4,9	2	1
Lo	Luvisol orthique	16,9	6,3	0,46	0,052	0,47	9,42	1,55	4,8	3	1
Lp	Luvisol plinthique	16,7	5,8	0,58	0,172	0,25	4,24	1,66	2,2	4	2
Lv	Luvisol vertique	47,6	7	1,26	0,116	2,79	25,56	1,5	21,2	4	2
Mo	Greyzem orthique	33,7	6,7	1,47	0,180	0,33	15,23	1,5	1,3	2	1
Nd	Nitosol dystrique	10,5	4,9	0,61	0,083	0,13	12,09	1,42	15,0	2	1
Ne	Nitosol eutrique	15,2	6,2	0,53	0,102	0,46	7,15	1,49	2,9	2	1
Nh	Nitosol humique	16,1	5,2	2,49	0,249	0,41	19,40	1,27	4,3	1	1
Od	Histosol dystrique	4,8	4,5	32,18	1,305	0,47	56,71	0,31	19,6	1	2
Oe	Histosol eutrique	5,1	5,8	40,30	4,000	1,13	86,40	0,33	23,9	1	2
Pg	Podzol gleyique	16,7	4,7	1,80	0,102	0,13	8,16	1,28	7,9	2	2
Ph	Podzol humique	3,5	4,2	2,00	0,114	0,06	5,75	1,35	2,8	2	2
Qa	Arenosol albique	5,7	6,1	0,46	0,042	0,18	3,16	1,59	5,3	4	1
Qc	Arenosol cambique	6,1	6,6	0,27	0,036	0,30	4,05	1,62	3,4	3	1
Qf	Arenosol ferralique	5,6	5,6	0,34	0,067	0,15	2,93	1,63	3,1	3	1
Ql	Arenosol luvique	4,9	6,5	0,23	0,023	0,22	3,32	1,58	2,0	4	1
R	Regosols	18,1	6,3	0,66	0,066	0,45	10,20	1,51	7,8	3	2
Rc	Regosol calcarique	20,5	8	0,38	0,138	0,54	10,54	1,46	10,3	2	2
Rd	Regosol dystrique	15,3	5,1	1,05	0,095	0,22	7,45	1,51	6,7	3	2
Re	Regosol eutrique	18,6	6,4	0,91	0,121	0,58	14,55	1,56	7,2	3	2
Sg	Solonetz gleyique	16,2	8	0,38	0,025	0,69	9,47	1,72	2,5	5	2
Sm	Solonetz mollique	25,5	6,6	0,65	0,080	0,90	13,85	1,68	1,5	3	2
So	Solonetz orthique	29,8	8,4	0,53	0,058	0,80	18,58	1,63	2,3	5	2
Th	Andosol humique	19,0	5,5	6,30	0,544	0,52	28,72	0,7	13,3	1	1
Tm	Andosol mollique	46,3	6,1	3,24	0,406	1,64	25,21	0,73	16,8	1	1
To	Andosol ochrique	56,5	5,8	1,68	0,178	0,80	31,65	0,79	20,4	2	1
Tv	Andosol vitrique	5,3	6,1	7,06	0,735	0,85	38,58	0,8	17,4	2	1
U	Rankers	8,7	5,6	2,32	0,202	0,18	8,15	1,48	2,1	3	3
V	Vertisols	57,4	7,5	0,80	0,080	1,21	45,30	1,67	6,5	4	2
Vc	Vertisol chromique	55,8	7,9	0,90	0,087	1,37	42,95	1,71	8,2	4	2
Vp	Vertisol pellique	59,2	7,2	1,16	0,125	1,05	48,61	1,59	3,6	4	2
W	Planosols	12,6	6	0,65	0,065	0,42	8,60	1,57	1,5	4	2
Wd	Planosol dystrique	6,0	4,2	0,20	0,025	0,25	3,00	1,28	1,1	4	2
We	Planosol eutrique	17,7	5,9	0,63	0,059	0,66	8,82	1,51	1,5	4	2
Ws	Planosol solodique	14,1	6,4	0,50	0,048	0,35	6,69	1,72	1,8	4	2
X	Xerosols	16,7	7,6	0,42	0,042	0,64	10,20	1,49	5,2	4	2
Xh	Xerosol haplique	10,5	8	0,45	0,052	0,83	7,80	1,52	4,1	4	2
Xk	Xerosol calcique	22,1	7,9	0,72	0,090	0,45	13,81	1,43	6,1	4	2
Xl	Xerosol luvique	17,0	7,3	0,32	0,033	0,50	10,71	1,53	6,9	4	2
Xy	Xerosol gypsique	17,0	7,9	1,32	0,100	0,80	11,10	1,39	5,2	4	2
Y	Yermosols	20,4	7,9	0,25	0,025	0,45	7,50	1,51	7,4	4	2
Yh	Yermosol haplique	32,5	8,1	0,17	0,030	0,55	24,65	1,54	7,0	4	2
Yk	Yermosol calcique	12,5	8	0,12	0,027	0,49	8,46	1,49	8,0	4	2
Yl	Yermosol luvique	16,2	7,5	0,27	0,026	0,31	9,83	1,6	7,8	4	2
Yt	Yermosol takyrique	48,9	7,2	0,21	0,021	1,07	7,50	1,51	7,4	4	2
Yy	Yermosol gypsique	13,1	7,8	0,18	0,018	0,51	13,00	1,18	7,8	4	2
Z	Solonchaks	24,2	8,2	0,43	0,043	1,70	13,20	1,48	5,2	5	2
Zg	Solonchak gleyique	28,9	8,3	0,49	0,084	2,03	20,85	1,47	6,9	5	2
Zo	Solonchak orthique	19,4	8,1	0,28	0,045	1,37	12,71	1,49	3,9	4	2
Zt	Solonchak takyrique	51,0	7,7	0,69	0,090	1,07	27,60	1,48	5,7	4	2

* Erod. = facteur d'érodibilité (1 = faible; 5 = élevé); Profondeur = classes de profondeur de sol (1 = > 1,0 m; 2 = 0,4-1,0 m; 3 = < 0,4 m)

Annexe 7

Données utilisées pour le bilan des éléments nutritifs au niveau général dans une étude FAO au Ghana, Kenya et Mali

IN1: ENGRAIS MINÉRAL

TABLEAU A7.1
Consommation d'engrais par culture par rapport au total consommé

	Ghana			Kenya			Mali		
Culture	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**
Agrumes	0	0	0	0,003	0,002	0,006			
Arachide	0,03	0,07	0,04	0,005	0,004	0	0,04	0,13	0,18
Bananier	0	0	0,02	0,008	0,009	0			
Blé				0,058	0,162	0	0	0	0
Cacaoyer	0	0,01	0,01						
Caféier	0	0	0	0,116	0,047	0,322			
Canne à sucre	0,01	0,01	0,01	0,026	0,026	0,068	0	0	0
Céréales, autres							0	0	0
Cocotier	0	0	0	0	0	0			
Cotonnier	0,03	0,03	0,04	0,002	0,042	0,011	0,53	0,47	0,40
Fibres							0	0	0
Fruits, autres	0	0	0	0,072	0,043	0,350	0	0	0
Hévéa	0	0	0						
Jachère	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Légumes	0,07	0,05	0,07	0,075	0,125	0,090	0,01	0,01	0,03
Légumineuses	0,01	0,04	0,01	0,106	0,119	0,079	0,00	0,07	0,05
Maïs	0,5	0,41	0,42	0,274	0,255	0	0,12	0,20	0,34
Manioc	0,05	0,02	0,03	0	0	0	0	0	0
Mil	0,05	0,06	0,01	0	0	0	0	0	0
Orge				0,008	0,028	0,011			
Palmier à huile	0,02	0,06	0,07						
Patate douce	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plantains	0,01	0,01	0,04	0,005	0,006	0			
Plantes à racines, autres	0,11	0,13	0,1	0	0	0	0	0	0
Pommes de terre				0,087	0,064	0			
Riz	0,06	0,06	0,09	0,014	0,009	0	0,30	0,12	0,00
Sésame				0	0	0			
Sorgho	0,05	0,04	0,04	0,052	0,025	0	0	0	0
Tabac	0	0	0	0,003	0,011	0,011	0	0	0
Théier				0,090	0,023	0,051	0	0	0
Tournesol				0	0	0			

TABLEAU A7.2
Consommation totale d'engrais

	N	P	K
		(tonnes)	
Ghana	7 994	2 002	3 920
Kenya	52 733	30 638	11 667
Mali	20 367	6 362	10 694

Source: FAOSTAT.

IN2: INTRANTS ORGANIQUES

TABLEAU A7.3
Facteurs «Application de fumier» par culture

Culture	Ghana	Kenya	Mali
Agrumes	0	0	-
Arachide	1	1	1
Bananier	0	0	-
Blé	-	1	1
Cacaoyer	0	-	-
Caféier	0	2	-
Canne à sucre	0	0	0
Céréales - Autres	-	-	1
Cocotier	0	0	-
Cotonnier	1	1	2
Fibres	-	-	0
Fruits - Autres	1	1	1
Hévéa	0	-	-
Jachère	0	0	0
Légumes	1	1	1
Légumineuses	1	1	0
Maïs	1	2	2
Manioc	0	0	0
Mil	1	1	1
Orge	-	1	-
Palmier à huile	0	-	-
Patate douce	0	0	0
Plantains	0	0	-
Plantes à racines - Autres	0	0	0
Pommes de terre	-	0	-
Riz	0	0	0
Sésame	-	1	-
Sorgho	1	1	1
Tabac	0	0	0
Théier	-	0	0
Tournesol	-	0	-

* 0 = pas de fumier, 1 = fumier, 2 = double dose de fumier.

TABLEAU A7.4
Facteurs «Agrégation» et «Perte» pendant le stockage du fumier

	Ghana	Kenya	Mali
Facteur Agrégation	2	1.5	2
Facteur Perte (pour cent)	40	15	25

OUT1: PRODUCTIONS AGRICOLES

TABLEAU A7.5
Surface récoltée et rendement par pays et par culture

Cultures	Rendement (kg/ha)			Surface récoltée (ha)		
	Ghana	Kenya	Mali	Ghana	Kenya	Mali
Agrumes	7 073	6 886	-	41 867	6 521	-
Arachide	1 007	1 276	854	185 077	15 145	190 248
Bananier	3 211	5 579	-	4 733	40 333	-
Blé	-	1 570	1 818	-	144 405	3 104
Cacaoyer	302	-	-	1 246 500	-	-
Caféier	323	362	-	15 710	178 136	-
Canne à sucre	25 369	83 621	67 970	5 600	58 000	4 477
Céréales - Autres	-	-	333	-	-	300
Cocotier	5 714	4 402	-	53 100	15 000	-
Cotonnier	820	595	1 011	50 387	38 866	496 401
Fibres	-	-	650	-	-	2 000
Fruits - Autres	7 536	6 653	13 950	19 800	23 482	3 197
Hévéa	611	-	-	17 133	-	-
Légumes	5 255	8 289	6 623	131 688	81 523	48 564
Légumineuses	100	350	371	153 333	700 000	319 715
Maïs	1 489	1 513	1 564	681 707	1 523 587	286 232
Manioc	11 871	9 288	10 071	619 760	98 333	907
Mil	885	504	823	178 910	88 233	920 416
Orge	-	2 581	-	-	22 267	-
Palmier à huile	9 404	-	-	106 667	-	-
Patate douce	1 369	9 579	7 024	60 200	71 333	3 730
Plantains	7 956	4 492	-	241 233	85 333	-
Plantes à racines - Autres	8 964	5 000	5 878	213 787	2 000	4 402
Pommes de terre	-	4 347	-	-	94 051	-
Riz	1 699	3 749	2 030	117 800	14 607	328 494
Sésame	-	429	-	-	28 000	-
Sorgho	1 056	915	970	322 553	136 667	634 920
Tabac	591	1 185	987	3 900	13 980	376
Théier	-	2 214	630	-	114 964	90
Tournesol	-	850	-	-	9 432	-

Source: FAOSTAT.

OUT2: RÉSIDUS DE RÉCOLTE

TABLEAU A7.6
Facteurs d'exportation des résidus de récolte par pays

Culture	Ghana	Kenya	Mali
		(pour cent)	
Agrumes	10	15	-
Arachide	30	60	80
Bananier	10	20	-
Blé	-	60	40
Cacaoyer	10	-	-
Caféier	10	15	-
Canne à sucre	10	20	20
Céréales, autres	-	-	60
Cocotier	10	20	-
Cotonnier*	60	60	60
Fibres	-	-	10
Fruits, autres	40	50	50
Hévéa	10	-	-
Jachère	5	5	5
Légumes	40	60	80
Légumineuses	30	70	80
Maïs	30	75	80
Manioc	40	20	20
Mil	30	70	50
Orge	-	35	-
Palmier à huile	10	-	-
Patate douce	30	20	30
Plantains	10	20	-
Plantes à racines, autres	25	20	25
Pommes de terre	-	20	-
Riz	15	20	35
Sésame	-	75	-
Sorgho	30	70	50
Tabac	10	20	10
Théier	-	15	10
Tournesol	-	40	-

* Le Cotonnier est généralement exporté par brûlis, ce qui veut dire que tout l'azote et 50 pour cent du K sont perdus.

Annexe 8

Résultats des calculs du bilan des éléments nutritifs au niveau général d'une étude FAO au Ghana, Kenya et Mali

TABLEAU A8.1
Flux d'azote au Ghana

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4	OUT5
	(ha)	(kg/ha)									
Cacaoyer	1 242 300	0,0	0,1	8,7	4,6	0,0	12,1	0,6	4,3	1,6	10,7
Jachère	824 900	0,0	0,2	7,0	4,1	0,0	0,0	0,2	11,7	1,3	7,4
Maïs	679 900	5,9	0,6	6,7	4,1	0,0	25,0	4,3	6,2	2,0	0,9
Manioc	618 100	0,6	0,2	6,8	4,1	0,0	49,9	21,8	1,8	1,4	4,6
Sorgho	323 700	1,2	0,5	6,7	4,1	0,0	15,3	3,4	6,9	1,4	2,9
Plantains	240 100	0,3	0,1	8,9	4,7	0,0	5,6	1,0	9,5	1,7	6,9
Plantes à racines, autres	214 500	4,1	0,2	7,2	4,2	0,0	41,2	4,3	0,8	1,8	-0,5
Arachide	184 800	1,3	0,5	6,8	38,8	0,0	37,5	4,8	1,6	1,4	3,8
Mil	177 900	2,2	0,6	6,7	4,0	0,0	17,0	5,4	6,8	1,5	4,4
Légumineuses	155 100	0,5	0,4	8,1	6,1	0,0	2,0	0,3	17,8	1,6	10,3
Légumes	131 700	4,2	0,3	8,7	4,6	0,0	47,3	6,7	0,7	2,2	12,0
Riz	118 300	4,1	0,1	8,8	6,9	0,0	19,7	2,9	16,1	2,1	14.3
Palmier à huile	107 000	1,5	0,1	8,8	4,6	0,0	27,3	3,5	0,0	1,8	16,2
Patate douce	60 200	0,0	0,1	6,9	4,1	0,0	6,6	0,9	9,6	1,3	-1,4
Cocotier	52 100	0,0	0,1	8,8	4,7	0,0	349	15,4	0,0	1,6	16,3
Cotonnier	50 400	4,8	0,3	7,2	4,2	0,0	15,3	9,1	9,2	2,0	5,0
Agrumes	42 500	0,0	0,1	7,4	4,3	0,0	12,7	0,4	2,0	1,3	9,3
Fruits, autres	19 900	0,0	0,2	8,5	4,6	0,0	15,1	5,4	1,7	1,6	16,5
Hévéa	18 000	0,0	0,0	10,5	5,1	0,0	4,2	0,1	5,1	1,9	1,9
Caféier	15 200	0,0	0,0	10,7	5,1	0,0	11,3	0,1	2,0	2,0	10,5
Canne à sucre	5 600	14,3	0,1	8,4	8,4	0,0	15,2	0,8	6,3	3,4	8,2
Bananier	4 600	0,0	0,1	9,0	4,7	0,0	3,9	0,5	14,3	1,6	34,6
Tabac	2 300	0,0	0,2	4,8	3,5	0,0	33,1	0,0	2,5	0,9	0,3

TABLEAU A8.2
Flux de phosphore au Ghana

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT5
	(ha)	(kg/ha)						
Cacaoyer	1 242 300	0,0	0,0	1,2	0,0	2,6	0,1	1,0
Jachère	824 900	0,0	0,1	0,9	0,0	0,0	0,1	0,5
Maïs	679 900	1,2	0,1	0,9	0,0	6,1	0,9	0,2
Manioc	618 100	0,1	0,0	0,9	0,0	5,7	4,3	0,0
Sorgho	323 700	0,2	0,1	0,9	0,0	5,8	1,4	0,1
Plantains	240 100	0,1	0,0	1,2	0,0	0,7	0,2	0,8
Plantes à racines, autres	214 500	1,2	0,1	1,0	0,0	2,7	1,1	0,1
Arachide	184 800	0,8	0,1	0,9	0,0	6,0	0,7	0,2
Mil	177 900	0,7	0,1	0,9	0,0	5,3	1,1	0,6
Légumineuses	155 100	0,5	0,1	1,1	0,0	0,3	0,0	1,2
Légumes	131 700	0,8	0,1	1,2	0,0	4,8	2,9	1,3
Riz	118 300	1,0	0,0	1,2	0,0	5,8	0,6	1,7
Palmier à huile	107 000	1,1	0,0	1,2	0,0	6,5	0,5	1,6
Patate douce	60 200	0,0	0,0	0,9	0,0	1,1	0,5	-0,1
Cocotier	52 100	0,0	0,0	1,2	0,0	41	3,3	1,8
Cotonnier	50 400	1,2	0,1	1,0	0,0	7,9	0,0	0,6
Agrumes	42 500	0,0	0,0	1,0	0,0	1,5	0,2	0,9
Fruits, autres	19 900	0,0	0,1	1,1	0,0	1,6	0,7	1,8
Hévéa	18 000	0,0	0,0	1,4	0,0	0,7	0,0	0,4
Caféier	15 200	0,0	0,0	1,4	0,0	0,8	0,1	1,4
Canne à sucre	5 600	3,6	0,0	1,1	0,0	5,5	0,8	0,7
Bananier	4 600	0,0	0,0	1,2	0,0	1,0	0,1	3,3
Tabac	2 300	0,0	0,1	0,7	0,0	4,8	0,0	0,1

TABLEAU A8.3
Flux de potassium au Ghana

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT5
	(ha)	(kg/ha)							
Cacaoyer	1 242 300	0,0	0,0	6,6	0,0	5,8	1,0	11,6	1,1
Jachère	824 900	0,0	0,2	6,1	0,0	0,0	0,2	6,6	0,9
Maïs	679 900	2,4	0,4	6,1	0,0	7,1	9,6	7,3	0,2
Manioc	618 100	0,2	0,1	5,7	0,0	50,5	6,7	6,1	0,1
Sorgho	323 700	0,5	0,4	6,0	0,0	4,0	9,2	6,4	0,5
Plantains	240 100	0,6	0,0	6,6	0,0	27,2	5,1	12,1	0,6
Plantes à racines, autres	214 500	1,8	0,1	5,9	0,0	26,1	6,9	8,4	-0,5
Arachides	184 800	0,8	0,4	6,1	0,0	8,2	4,5	6,6	0,6
Mil	177 900	0,2	0,5	6,0	0,0	4,8	15,9	6,5	1,3
Légumineuses	155 100	0,3	0,3	6,4	0,0	1,1	0,4	10,0	0,8
Légumes	131 700	2,1	0,2	6,5	0,0	13,6	16,5	12,2	1,3
Riz	118 300	3,0	0,0	6,6	0,0	5,8	9,1	12,4	1,3
Palmier à huile	107 000	2,6	0,0	6,5	0,0	38,4	3,1	12,0	1,9
Patate douce	60 200	0,0	0,1	5,8	0,0	10,0	1,3	6,9	-0,5
Cocotier	52 100	0,0	0,0	6,6	0,0	56,2	14,5	11,9	1,7
Cotonnier	50 400	3,1	0,2	6,0	0,0	7,4	9,8	8,5	0,5
Agrumes	42 500	0,0	0,1	6,0	0,0	16,5	3,1	8,1	1,7
Fruits, autres	19 900	0,0	0,1	6,4	0,0	15,1	14,8	11,0	1,8
Hévéa	18 000	0,0	0,0	7,2	0,0	2,8	0,2	16,0	0,0
Caféier	15 200	0,0	0,0	7,3	0,0	5,4	0,3	16,6	0,8
Canne à sucre	5 600	7,0	0,0	6,3	0,0	29,6	0,8	13,2	0,8
Bananier	4 600	16,6	0,0	6,6	0,0	14,5	3,8	12,1	4,5
Tabac	2 300	0,0	0,2	4,5	0,0	42,9	0,0	0,5	0,2

TABLEAU A8.4
Flux d'azote au Kenya

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4	OUT5
	(ha)	(kg/ha)									
Maïs	1 524 700	9,5	5,4	3,7	3,2	0,0	25,4	11,0	6,7	2,7	24,4
Jachère	914 800	0,0	1,7	4,0	3,3	0,0	0,0	1,7	11,2	1,1	25,3
Légumineuses	699 800	8,0	1,7	3,2	8,9	0,0	7,0	2,5	12,2	1,9	9,6
Caféier	179 200	34,2	10,6	6,6	4,1	0,1	12,7	0,2	20,8	7,2	37,0
Blé	144 500	21,1	2,9	3,8	3,3	0,0	35,0	4,0	5,9	3,9	13,3
Sorgho	136 600	20,0	2,3	3,3	3,1	0,0	13,3	6,9	7,0	3,7	10,7
Théier	114 900	41,2	3,5	7,3	4,4	0,0	77,5	0,0	2,3	7,3	67,0
Manioc	98 600	0,0	2,8	6,3	4,1	0,0	39,0	8,5	13,1	1,7	52,5
Pommes de terre	94 100	48,6	0,7	3,1	3,0	0,0	19,1	2,0	24,4	7,1	35,4
Mil	90 100	0,0	1,4	2,7	2,9	0,0	9,7	7,2	4,8	0,8	1,5
Plantains	84 200	2,8	3,6	7,1	4,3	0,0	3,1	1,1	31,5	2,3	49,9
Légumes	81 500	48,2	5,7	5,7	3,9	0,0	74,6	15,9	19,8	8,1	-3,1
Patate douce	71 900	0,0	1,2	4,0	3,4	0,0	46,0	4,0	0,3	1,0	21,0
Canne à sucre	60 000	23,5	2,2	8,1	17,4	0,0	50,2	5,0	2,2	4,9	23,5
Bananier	40 200	9,9	2,8	6,2	4,1	0,0	6,7	1,8	30,4	3,0	6,2
Cotonnier	38 900	2,1	3,4	4,1	3,4	0,0	11,1	6,6	6,1	1,6	53,8
Sésame	26 400	0,0	1,6	2,9	3,0	0,0	12,9	4,8	4,3	0,8	-9,5
Fruits, autres	25 200	161	6,6	6,8	4,2	0,0	13,3	6,0	69,9	23,2	64,7
Orge	22 100	18,0	1,4	2,7	2,9	0,0	40,0	6,3	2,8	3,1	-0,4
Arachide	16 500	15,9	3,2	3,6	47,2	0,0	47,5	12,2	4,8	3,2	7,7
Tabac	14 100	11,5	1,4	3,1	3,0	0,0	66,3	0,0	0,0	2,3	0,2
Riz	13 600	49,4	1,3	8,1	8,3	0,0	43,5	8,5	25,6	8,1	28,9
Cocotier	13 500	0,0	3,5	6,7	4,2	0,0	268,5	23,8	0,0	1,9	163,4
Tournesol	10 700	0,0	1,1	3,5	3,2	0,0	20,4	7,8	8,3	0,8	16,2
Agrumes	5 200	28,3	2,2	6,6	4,2	0,0	12,4	0,6	17,3	5,3	13,3
Plantes à racines, autres	1 800	0,0	0,5	5,1	3,7	0,0	23,0	1,9	5,3	1,1	-0,1

TABLEAU A8.5
Flux de phosphore au Kenya

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT5
	(ha)	(kg/ha)						
Maïs	1 524 700	5,1	1,1	0,5	0,0	6,2	2,2	3,4
Jachère	914 800	0,0	0,4	0,5	0,0	0,0	0,4	2,4
Légumineuses	699 800	5,2	0,4	0,4	0,0	1,2	0,2	1,3
Caféier	179 200	8,1	2,2	0,8	0,0,	0,9	0,2	2,7
Blé	144 500	34,4	0,6	0,5	0,0	6,8	1,7	1,7
Sorgho	136 600	5,5	0,5	0,4	0,0	5,0	2,9	1,8
Théier	114 900	6,0	0,7	0,9	0,0	8,4	0,0	5,9
Manioc	98 600	0,0	0,6	0,8	0,0	4,4	1,7	2,6
Pommes de terre	94 100	20,9	0,1	0,4	0,0	5,7	0,6	4,5
Mil	90 100	0,0	0,3	0,3	0,0	3,0	1,4	0,2
Plantains	84 200	2,0	0,8	0,9	0,0	0,4	0,3	2,3
Légumes	81 500	46,8	1,2	0,7	0,0	7,6	6,9	-0,1
Patate douce	71 900	0,0	0,3	0,5	0,0	7,5	2,2	1,4
Canne à sucre	60 000	14,0	0,4	1,0	0,0	18,2	5,1	2,7
Bananier	40 200	7,2	0,6	0,8	0,0	1,7	0,3	-1,3
Cotonnier	38 900	32,7	0,7	0,5	0,0	5,7	0,0	5,8
Sésame	26 400	0,0	0,3	0,4	0,0	2,6	1,7	-0,7
Fruits, autres	25 200	56,6	1,4	0,9	0,0	1,4	0,7	3,2
Orge	22 100	38,9	0,3	0,4	0,0	7,2	0,9	-0,1
Arachide	16 500	7,6	0,7	0,5	0,0	7,6	1,8	0,9
Tabac	14 100	24,8	0,3	0,4	0,0	9,7	0,0	0,0
Riz	13 600	19,8	0,3	1,0	0,0	12,7	1,7	2,9
Cocotier	13 500	0,0	0,7	0,9	0,0	31,6	5,0	7,1
Tournesol	10 700	0,0	0,2	0,4	0,0	3,0	1,1	1,6
Agrumes	5 200	8,9	0,5	0,9	0,0	1,5	0,2	0,7
Plantes à racines, autres	1 800	0,0	0,1	0,7	0,0	1,5	0,5	0,0

TABLEAU A8.6
Flux de potassium au Kenya

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT5
	(ha)	(kg/ha)							
Maïs	1 524 700	0,0	4,5	2,0	0,0	7,2	24,3	2,3	7,9
Jachère	914 800	0,0	1,4	2,2	0,0	0,0	1,4	1,3	4,6
Légumineuses	699 800	1,3	1,4	1,7	0,0	3,9	3,2	1,0	2,8
Caféier	179 200	21,1	8,8	3,5	0,0	6,1	0,5	12,7	7,5
Blé	144 500	0,0	2,4	2,1	0,0	9,2	25,1	4,7	3,8
Sorgho	136 600	0,0	1,9	1,8	0,0	3,4	18,7	2,2	1,6
Théier	114 900	5,2	2,8	3,9	0,0	29,7	0,0	14,7	7,6
Manioc	98 600	0,0	2,3	3,4	0,0	39,5	2,6	5,0	4,2
Pommes de terre	94 100	0,0	0,6	1,7	0,0	30,1	3,9	6,8	7,2
Mil	90 100	0,0	1,2	1,5	0,0	2,7	21,1	0,0	0,3
Plantains	84 200	0,0	2,9	3,8	0,0	15,3	5,8	6,4	5,7
Légumes	81 500	12,9	4,9	3,1	0,0	21,4	39,0	14,0	-0,5
Patate douce	71 900	0,0	1,0	2,1	0,0	70,2	6,2	1,1	4,1
Canne à sucre	60 000	13,6	1,8	4,3	0,0	97,6	5,6	12,2	8,0
Bananier	40 200	0,0	2,3	3,4	0,0	25,1	13,3	6,1	-2,9
Cotonnier	38 900	3,4	2,8	2,2	0,0	5,4	7,1	1,8	10,1
Sésame	26 400	0,0	1,4	1,6	0,0	2,9	6,8	0,1	-2,0
Fruits, autres	25 200	174	5,3	3,7	0,0	13,3	16,4	33,6	6,0
Orge	22 100	5,9	1,1	1,5	0,0	15,5	19,0	0,8	-0,1
Arachide	16 500	0,0	2,7	1,9	0,0	10,4	11,4	2,7	2,1
Tabac	14 100	9,4	1,2	1,7	0,0	86,1	0,0	1,5	0,0
Riz	13 600	0,0	1,1	4,3	0,0	12,8	26,8	16,7	9,5
Cocotier	13 500	0,0	2,8	3,6	0,0	43,3	22,3	4,7	11,4
Tournesol	10 700	0,0	0,9	1,9	0,0	4,7	14,0	1,0	1,5
Agrumes	5 200	10,1	1,9	3,6	0,0	16,1	4,6	10,7	1,4
Plantes à racines, autres	1 800	0,0	0,4	2,8	0,0	14,6	3,1	3,4	0,0

TABLEAU A8.7
Flux d'azote au Mali

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN4	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT4	OUT5
	(ha)	(kg/ha)									
Jachère	1 402 800	0,0	0,6	4,2	3,4	0,1	0,0	0,6	7,6	0,9	0,3
Mil	921 000	0,0	0,9	3,9	3,3	0,0	15,8	8,4	5,1	0,9	0,4
Sorgho	633 400	0,0	1,2	5,2	3,7	0,0	14,1	5,2	7,5	1,2	1,2
Cotonnier	493 800	21,7	1,7	4,9	3,7	0,0	18,9	8,4	10,6	4,0	0,8
Riz	328 800	18,6	1,2	2,7	17,1	0,4	23,5	8,0	9,8	3,2	0,8
Légumineuses	316 200	0,0	0,4	5,1	9,9	0,0	7,4	3,1	12,8	1,0	-0,3
Maïs	284 600	8,5	1,2	4,2	3,4	0,0	26,3	12,1	6,1	2,1	0,4
Arachide	191 700	4,3	1,0	4,7	33,1	0,0	31,8	10,9	6,5	1,6	0,3
Légumes	46 800	4,2	1,2	6,6	4,1	0,0	59,6	17,0	1,9	2,0	-6,9
Canne à sucre	6 800	0,0	0,5	7,5	14,8	0,0	40,8	4,1	0,0	1,5	0,4
Manioc	5 500	0,0	0,5	7,2	4,3	0,0	42,3	9,3	0,0	1,4	3,7
Fruits, autres	4 700	0,0	0,9	7,4	4,4	0,0	27,9	12,6	0,0	1,5	-14,7
Patate douce	4 000	0,0	0,3	4,2	3,4	0,0	33,7	4,4	2,5	0,9	0,3
Tabac	2 300	0,0	0,4	4,7	3,6	0,0	55,3	0,0	0,0	1,0	0,1
Blé	2 300	0,0	0,9	3,9	3,3	0,0	40,5	3,1	0,0	0,9	0,3
Fibres	1 900	0,0	0,2	3,8	3,3	0,0	3,3	0,1	7,7	0,8	0,3

TABLEAU A8.8
Flux de phosphore au Mali

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT5
	(ha)	(kg/ha)						
Jachère	1 402 800	0,0	0,1	0,5	0,0	0,0	0,1	0,0
Mil	921 000	0,0	0,2	0,5	0,0	4,9	1,6	0,1
Sorgho	633 400	0,0	0,3	0,7	0,0	5,3	2,2	0,2
Cotonnier	493 800	6,0	0,4	0,6	0,0	9,8	0,0	0,2
Riz	328 800	2,3	0,3	0,3	0,0	6,9	1,6	0,1
Légumineuses	316 200	1,4	0,1	0,7	0,0	1,3	0,3	0,0
Maïs	284 600	4,4	0,3	0,5	0,0	6,4	2,4	0,1
Arachide	191 700	4,3	0,2	0,6	0,0	5,1	1,6	0,1
Légumes	46 800	1,3	0,3	0,9	0,0	6,0	7,4	0,0
Canne à sucre	6 800	0,0	0,1	1,0	0,0	14,8	4,1	0,0
Manioc	5 500	0,0	0,1	0,9	0,0	4,8	1,8	0,9
Fruits, autres	4 700	0,0	0,2	1,0	0,0	3,0	1,5	-0,9
Patate douce	4 000	0,0	0,1	0,5	0,0	5,5	2,5	0,0
Tabac	2 300	0,0	0,1	0,6	0,0	8,1	0,0	0,0
Blé	2 300	0,0	0,2	0,5	0,0	7,8	1,3	0,0
Fibres	1 900	0,0	0,0	0,5	0,0	0,3	0,0	0,0

TABLEAU A8.9
Flux de potassium au Mali

Cultures	Surface	IN1	IN2	IN3	IN5	OUT1	OUT2	OUT3	OUT5
	(ha)	(kg/ha)							
Jachère	1 402 800	0,0	0,4	2,3	0,0	0,0	0,4	1,8	0,1
Mil	921 000	0,0	0,7	2,1	0,0	4,5	24,6	0,9	0,1
Sorgho	633 400	0,0	1,0	2,8	0,0	3,6	14,1	3,7	0,2
Cotonnier	493 800	8,6	1,4	2,6	0,0	9,1	9,0	6,7	0,2
Riz	328 800	0,0	1,0	1,4	0,2	6,9	25,4	0,7	0,2
Légumineuses	316 200	1,7	0,3	2,7	0,0	4,1	3,9	3,7	-0,1
Maïs	284 600	12,7	0,9	2,3	0,0	7,4	26,8	2,8	0,1
Arachide	191 700	10,1	0,8	2,6	0,0	7,0	10,2	3,4	0,1
Légumes	46 800	6,6	1,0	3,5	0,0	17,1	41,5	8,5	-1,3
Canne à sucre	6 800	0,0	0,4	4,1	0,0	79,3	4,5	9,6	0,0
Manioc	5 500	0,0	0,4	3,9	0,0	42,8	2,9	8,2	0,6
Fruits, autres	4 700	0,0	0,8	4,0	0,0	27,9	34,3	9,2	-2,7
Patate douce	4 000	0,0	0,2	2,2	0,0	51,5	6,8	1,0	0,1
Tabac	2 300	0,0	0,3	2,5	0,0	71,7	0,0	2,7	0,0
Blé	2 300	0,0	0,7	2,1	0,0	10,6	19,4	1,0	0,1
Fibres	1 900	0,0	0,1	2,1	0,0	3,9	0,6	0,7	0,1

Annexe 9

Données utilisées pour le bilan des éléments nutritifs au niveau intermédiaire d'une étude FAO de 2003 au Ghana, Kenya et Mali

GHANA

TABLEAU A9. 1
Données de production pour le district de Nkawie

Cultures	Surface récoltée (ha)	Rendement (tonnes/ha)	Production (tonnes)	Exportation des Résidus (pour cent)
Cacaoyer	48 493	0,22	10 652	50
Igname	1 175	11,6	12 992	25
Jachère	14 600	0	0	0*
Maïs	11 455	1,75	19 953	30
Manioc	11 838	11,6	137 317	40
Plantain	11 725	8,2	96 106	10
Riz	1 462	1,54	2 245	15
Taro	9 514	10,25	97 475	25

* Pas de facteur d'exportation, la jachère est considérée comme non touchée.

TABLEAU A9. 2
Données de production pour le district de Wassa Amenfi

Culture	Surface récoltée (ha)	Rendement (tonnes/ha)	Production (tonnes)	Exportation des Résidus (pour cent)
Cacaoyer	240 961	0,22	53 045	50
Igname	1 500	18	27 000	15
Jachère	7 300	0	0	0*
Légumes	250	6	1 500	30
Maïs	5 650	1,5	8 475	15
Manioc	7 700	10	70 000	30
Palmier à huile	900	12	10 800	10
Plantain	5 000	8	40 000	10
Riz	2 112	1,3	2 746	10
Taro	3 000	7	21 000	15

* Pas de facteur d'exportation, la jachère est considérée comme non touchée.

TABLEAU A9.3
Nombre d'animaux d'élevage, deux districts

Animal	Nkawie	Wassa Amenfi	Poids des corps (kg)
Bovin		156	175
Chèvre	2 114	2 623	16
Volaille	528 608	4 565	2
Mouton	3 176	11 480	16

TABLEAU A9.4
Données de teneurs en éléments nutritifs

Produit	N	P	K	Unité
Litière de feuilles de Cacaoyer	1,19	0,08	0,22	pour cent poids séché au four
Enveloppe de cabosse	1,14	0,13	3,32	pour cent d'enveloppe séchée au four
Cacaoyer – fève	20,70	3,60	6,70	kg/tonne de produit récolté
Cacaoyer - téguments	2,02	0,32	1,70	kg/tonne de produit récolté

Source: Omotoso, 1975.

KENYA

TABLEAU A9.5
Données de production pour le système théier – caféier – laiterie dans le district d'Embu

Culture	Surface récoltée (ha)	Rendement (tonnes/ha)	Production (tonnes)	Exportation des Résidus (pour cent)
Caféier	8 813	1,5	12 800	15
Haricot	2 748	0,5	1 240	97
Herbe à éléphant	602	35,0	21 076	-
Jachère	1 800	0	18 000*	5
Maïs	5 143	2,0	10 452	95
Manioc	515	10,3	5 280	20
Maranta	260	3,4	894	20
Niébé	280	1,5	410	97
Patate douce	140	9,6	1 341	95
Pomme de terre	678	6,1	4 130	20
Sorgho	207	0,9	189	85
Théier	1 092	8,8	9 600	15

* Estimation basée sur un 'rendement' de 10 tonnes/ha et facteur d'exportation des résidus de 5pour cent (bois de feu et fourrage).

TABLEAU A9.6
Nombre estimé d'animaux sur la surface étudiée

Type d'animal	Population	Poids des corps (kg)
Bovin, lait	19 930	300
Bovin, viande	3 258	300
Chèvre, fromage	227	16
Chèvre, viande	12 483	16
Mouton, laine	77	16
Mouton, Poils	4 991	16
Volaille	14 261	2

TABLEAU A9.7
Données d'application de fumier pour la zone théier – caféier - laiterie

Culture	Surface récoltée (ha)	Facteur fumier total (pour cent)	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)
Caféier	8 813	36	5,3	1,1	4,6
Haricot	2 748	2	0,9	0,2	0,8
Herbe à éléphant	602	5	10,7	2,2	9,3
Jachère	1 800	4,5	3,2	0,6	2,8
Maïs	5 143	51	12,8	2,6	11,1
Patate douce	140	0,5	4,6	0,9	4,0
Sorgho	1 197	1	6,2	1,3	5,4

MALI

TABLEAU A9.8
Nombre d'exploitations agricoles et surface cultivée

	1997	1998	1999	Moyenne*
Nombre d'exploitations agricoles	41 031	42 262	43 530	42 274
Surface cultivée par exploitation(ha)	10,75	11,49	11,35	11,20

* La surface totale cultivée est de 4 733 km^2, soit 25,5 pour cent de la surface totale.
Source: CMDT/SE, 1998-2000.

TABLEAU A9.9
Surfaces récoltées

Culture	1997		1998		1999		Moyenne		Total
	ha	pour cent exploit.	ha	pour cent exploit.	ha	pour cent exploit.	ha	pour cent exploit.	ha
Arachide	0,55	57	0,49	56	0,62	59	0,6	57,3	0,32
Cotonnier	3,94	90	4,33	89	3,4	85	3,9	88,0	3,42
Maïs	1,17	93	1,59	96	1,56	92	1,4	93,7	1,35
Mil	3,13	73	2,63	69	3,74	85	3,2	75,7	2,40
Niébé	0,49	28	0,57	22	0,54	25	0,5	25,0	0,13
Riz	0,6	12	1,19	20	0,68	16	0,8	16,0	0,13
Sorgho	3,08	95	3,63	96	3,02	94	3,2	95,0	3,08

Source: CMDT/SE, 1998-2000.

TABLEAU A9.10
Rendement en kg/ha

Culture	1997	1998	1999	Moyenne
Arachide	582	503	607	564
Cotonnier	948	961	985	965
Maïs	1 746	1 743	1 678	1 722
Mil	759	885	932	859
Niébé	547	292	524	454
Riz	1 439	1 424	827	1 230
Sorgho	974	882	1 107	988

Source: CMDT/SE, 1998-2000.

TABLEAU A9.11
Données d'application d'engrais

Cultures	Engrais *	1997		1998		1999		Moyenne	
		pour cent champs	(kg/ha)	pour cent champs	(kg/ha)	pour cent champs	(kg/ha)	pour cent champs	(kg/ha)
Cotonnier	1	98	48	97	46	?	49	97,5	48
	2	99	113	100	119	?	125	99,5	119
	3	1	58	0	0	0	0	0,3	19
Maïs	1	70	65	72	61	65	56	69	61
	2	26	68	15	60	14	89	18	72
	3	45	79	55	74	53	83	51	79
Mil	1	21	36	17	48	23	36	20	40
	2	0	0	0	0	2	49	1	16
	3	19	51	9	60	31	54	20	55
Riz	1	4	46	18	33	35	68	19	49
	3	7	110	6	56	17	73	10	80
Sorgho	1	8	45	11	39	15	43	11	42
	2	1	19	1	47	3	47	2	38
	3	16	35	10	65	20	62	15	54

* 1 = urée, 2 = Complexe coton et 3 = Complexe céréales
Source: CMDT/SE, 1998-2000.

TABLEAU A9.12
Nombre d'animaux par exploitation et total

Animal	1997	1998	1999	Moyenne	Total	Poids des corps (kg)
Ânes	1,0	1,0	1,0	1,0	42 274	
Bovins	12,1	13,8	12,3	12,7	538 289	200
Caprins	4,6	5,8	4,3	4,9	207 143	20
Ovins	5,4	6,2	5,7	5,8	243 780	20
Porcins	0,7	0,3	0,7	0,6	23 955	
Volaille	21,6	23,3	21,0	22,0	928 619	1

Source: CMDT/SE, 1998-2000.

TABLEAU A9.13
Données d'application de fumier dans la région de Koutiala

Culture	1997		1998		1999		Moyenne	
	(kg/ha)	(pour cent)	(kg/ha)	(pour cent)	(kg/ha)	(pour cent)	(kg/ha)	(pour cent)
Cotonnier	3 463	86,0	4 031	76,0	5 078	72,0	4 191	78,0
Maïs	5 765	9,5	5 812	9,5	6 241	28,0	5 939	15,7
Mil	1 869	2,4	2 273	2,4	1 451	2,4	1 864	2,4
Riz	0	0	1 714	2	0	0	571	0,8
Sorgho	607	2,4	1 636	0,0	0	0,0	748	0,8

Source: SEP, 1997-99.

Annexe 10

Résultats des calculs de bilan d'éléments nutritifs au niveau intermédiaire d'une étude FAO de 2003 au Ghana, Kenya et Mali

GHANA, DISTRICT DE NKAWIE

Manioc

Surface récoltée: 11 838 ha 137 317 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,64	0,06	0,19	(niveau global)
IN2	0,59	0,21	0,20	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	48,72	5,57	49,30	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	21,34	4,22	6,59	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	8,39	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	1,50	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	9,60	1,09	1,00	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-68,3	-9,6	-59,0	

Cacaoyer

Surface récoltée: 48 493 ha 10 652 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,06	0,08	(63 ha fertilisés avec kg P et kg K)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas d'intrant organique)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	4,55	0,79	1,47	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	1,52	0,17	4,44	(50 pour cent d'épluchures perdues, mises en 1 seul tas ou utilisées comme savon)
OUT3	5,52	0,00	8,34	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,7)
OUT4	1,34	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	1,92	0,22	0,20	(1 tonne/ha érosion)
Total	-3,2	-0,1	-8,5	

Taro

Surface récoltée: 9 514 ha 97 475 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,11	1,22	1,83	(niveau global)
IN2	0,89	0,31	0,30	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	47,13	3,07	29,92	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,87	1,23	7,89	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	8,70	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,97	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	13,44	1,53	1,40	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-50,8	-3,3	-39,9	

Jachère

Surface en jeu:: 14 600 ha 0 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(pas d'engrais minéral)
IN2	0,00	0,00	0,00	(l'apport de fumier est égal à l'exportation des résidus)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	0,00	0,00	0,00	(pas de production)
OUT2	0,00	0,00	0,00	(l'exportation des résidus est égale à l'apport de fumier)
OUT3	9,93	0,00	8,33	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,34	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,96	0,11	0,10	(0,5 tonne/ha érosion)
Total	-0,6	0,9	-2,5	

Maïs

Surface récoltée: 11 455 ha 19 953 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	5,86	1,20	2,42	(niveau global)
IN2	2,05	0,72	0,69	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	29,26	7,12	8,27	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	5,07	1,00	11,19	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	5,61	0,00	8,86	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	2,34	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	9,60	1,09	1,00	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-32,4	-6,3	-20,3	

Plantain

Surface récoltée: 11 725 ha 96 106 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha		
IN1	0,33	0,08	0,65	(niveau global)
IN2	0,60	0,21	0,20	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	5,74	0,71	28,03	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	0,98	0,25	5,26	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	7,34	0,00	8,47	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,46	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	5,76	0,66	0,60	(3 tonnes/ha érosion)
Total	-8,7	-0,3	-35,6	

Riz

Surface récoltée: 1 462 ha 2 245 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,07	1,02	3,00	(niveau global)
IN2	0,00	0,00	0,00	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	26,49	7,73	3,68	(sédimentation de 1 mm/an, incluant le facteur enrichissement)
OUT1	17,81	5,21	5,25	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	2,60	0,53	8,23	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	12,45	0,00	8,85	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,86	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,00	0,00	0,00	(pas d'érosion, riz seulement dans les basses terres)
Total	7,5	4,0	-9,8	

Igname

Surface récoltée: 1 175 ha 12 992 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,11	1,22	1,83	(niveau global)
IN2	0,80	0,28	0,27	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,36	0,98	5,91	(niveau global)
IN4	4,26	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	50,86	3,32	32,29	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	5,25	1,33	8,51	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	8,69	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,96	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	13,44	1,53	1,40	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-55,0	-3,7	-42,9	

GHANA, DISTRICT DE WASSA AMENFI

Manioc

Surface récoltée: 7 700 ha 77 000 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,64	0,06	0,19	(niveau global)
IN2	0,14	0,04	0,09	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	42,00	4,80	42,50	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	13,80	2,73	4,26	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	8,87	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	1,49	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	8,66	1,15	0,70	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-53,3	-7,6	-50,4	

Cacaoyer

Surface récoltée: 240 961 ha 53 045 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,01	0,01	(40 ha fertilisés avec kg P et kg K)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas d'intrants organiques)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	4,56	0,79	1,47	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	1,53	0,17	4,45	(50 pour cent d'épluchures perdues, mises en 1 seul tas ou utilisées comme savon)
OUT3	4,15	0,00	8,83	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,7)
OUT4	1,39	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	1,73	0,23	0,14	(1 tonne/ha érosion)
Total	-1,5	-0,2	-9,2	

Taro

Surface récoltée: 3 000 ha 21 000 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,11	1,22	1,83	(niveau global)
IN2	0,24	0,06	0,16	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	32,20	2,10	20,44	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	2,00	0,50	3,23	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	1,96	0,00	9,17	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,94	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	12,13	1,61	0,99	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-34,0	-1,9	-26,1	

Jachère

Surface récoltée: 7 300 ha 0 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(pas d'engrais minéral)
IN2	0,00	0,00	0,00	(l'apport de fumier est égal à l'exportation des résidus)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	0,00	0,00	0,00	(pas de production)
OUT2	0,00	0,00	0,00	(l'exportation des résidus est égale à l'apport de fumier)
OUT3	7,84	0,00	8,83	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,39	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,87	0,11	0,07	(0,5 tonne/ha érosion)
Total	1,8	0,9	-3,2	

Maïs

Surface récoltée: 5 650 ha 8 475 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	5,86	1,20	2,42	(niveau global)
IN2	0,52	0,13	0,33	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	25,20	6,14	7,13	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	2,18	0,43	4,82	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	3,83	0,00	9,30	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	2,20	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	8,66	1,15	0,70	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-23,8	-5,4	-13,5	

Palmier à huile

Surface récoltée: 900 ha 10 800 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	1,50	1,13	2,57	(niveau global)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas d'intrants organiques)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	34,80	8,40	48,96	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,44	0,68	4,00	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	9,27	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	1,58	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	1,73	0,23	0,14	(1 tonne/ha érosion)
Total	-29,2	-7,2	-54,1	

Plantain

Surface récoltée: 5 000 ha 40 000 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,33	0,08	0,65	(niveau global)
IN2	0,15	0,04	0,09	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	5,60	0,70	27,36	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	0,96	0,24	5,14	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	5,32	0,00	8,95	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,45	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	5,20	0,69	0,42	(3 tonnes/ha érosion)
Total	-6,2	-0,5	-35,4	

Riz

Surface récoltée: 2 112 ha 2 746 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,07	1,02	3,00	(niveau global)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas d'intrants organiques)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	22,88	7,65	2,48	(sédimentation de 1 mm/an, incluant un facteur enrichissement)
OUT1	15,08	4,41	4,45	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	1,47	0,30	4,65	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	10,26	0,00	9,34	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,90	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,00	0,00	0,00	(pas d'érosion, riz seulement dans les basses terres)
Total	10,1	5,0	-7,3	

Légumes

Surface récoltée: 250 ha 1 500 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,25	0,76	2,08	(niveau global)
IN2	5,88	1,52	3,74	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	54,00	5,46	15,48	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	5,76	2,50	14,09	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	9,83	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,4)
OUT4	2,68	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	17,33	2,30	1,41	(10 tonnes/ha érosion)
Total	-57,8	-7,0	-29,3	

Igname

Surface récoltée: 1 500 ha 27 000 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	4,11	1,22	1,83	(niveau global)
IN2	0,24	0,06	0,16	((facteur fumier disponible /perte) / surface récoltée)
IN3	7,53	1,00	5,71	(niveau global)
IN4	4,33	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	82,80	5,40	52,56	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	5,13	1,30	8,32	(production * exportation résidus * teneur en éléments nutritifs)
OUT3	0,00	0,00	9,17	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,94	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	12,13	1,61	0,99	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-85,8	-6,0	-63,3	

KENYA, DISTRICT D'EMBU

Maranta

Surface récoltée: 260 ha 894 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(pas d'engrais)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas de fumier)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	23,80	7,00	42,00	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	2,66	0,70	4,34	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (20pour cent))
OUT3	35,15	0,00	4,36	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,51	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,00	0,00	0,00	(0 tonne/ha érosion, cultivé dans les vallées)
Total	-52,1	-6,8	-47,0	

Haricot

Surface récoltée: 2 748 ha 1 240 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	5,70	5,60	0,00	(Staverman, 2003)
IN2	0,94	0,19	0,82	(2 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	16,01	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	16,70	1,31	10,56	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,55	0,44	5,73	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (97 pour cent))
OUT3	44,83	0,00	4,50	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	2,36	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	103,04	30,80	7,49	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-142,0	-25,9	-23,8	

Manioc

Surface récoltée: 515 ha 5 280 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(pas d'engrais)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas de fumier)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	127,13	7,18	82,02	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	9,43	1,85	2,87	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (20pour cent))
OUT3	10,88	0,00	4,36	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	1,51	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	147,20	44,00	10,70	(10 tonnes/ha érosion)
Total	-285,1	-52,1	-96,3	

Caféier

Surface récoltée: 8 813 ha 12 800 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	59,10	13,20	0,00	(Staverman, 2003)
IN2	5,28	1,06	4,59	(36 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	4,80	0,32	4,00	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	0,52	0,46	1,12	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (15 pour cent))
OUT3	25,95	0,00	5,15	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	9,70	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	73,60	22,00	5,35	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-39,1	-7,6	-7,3	

Niébé

Surface récoltée: 280 ha 410 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	40,00	0,00	(quantité raccomendée)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas de fumier)
IN3	5,86	0,76	3,16	(provient des précipitations)
IN4	24,38	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	25,38	1,80	14,40	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	11,06	0,64	6,40	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (97pour cent))
OUT3	29,32	0,00	2,02	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	1,32	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	70,84	30,80	6,90	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-107,7	7,5	-26,6	

Jachère

Surface en jeu: 1 800 ha 18 000 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(Staverman, 2003)
IN2	3,23	0,65	2,81	(4,5 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	0,00	0,00	0,00	(pas de production)
OUT2	2,04	0,26	2,21	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (5 pour cent))
OUT3	27,61	0,00	4,84	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,92	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	7,36	2,20	0,53	(0,5 tonne/ha érosion)
Total	-24,6	-0,9	-1,1	

Maïs

Surface récoltée: 5 143 ha 10 452 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	18,10	8,10	1,80	(Staverman, 2003)
IN2	12,82	2,57	11,14	(51 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	40,65	3,86	33,13	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	18,73	3,67	41,32	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (95 pour cent))
OUT3	33,57	0,00	6,59	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	5,45	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	117,76	35,20	8,56	(8 tonnes/ha érosion)
Total	-174,2	-31,2	-73,0	

Herbe à éléphant

Surface récoltée: 602 ha 21 076 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	32,90	6,00	0,00	(Staverman, 2003)
IN2	10,74	2,15	9,33	(5 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	136,50	14,00	182,00	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	0,00	0,00	0,00	(les résidus sont les productions)
OUT3	21,75	0,00	5,97	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	7,07	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	58,88	17,60	4,28	(4 tonnes/ha érosion)
Total	-169,5	-22,6	-179,2	

Pomme de terre

Surface récoltée: 678 ha 4 130 tonnes production

	N	P	K	(kg/ha)
		(kg/ha)		
IN1	45,00	50,00	0,00	(Min. d'agriculture et GTZ, 1998)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas de fumier)
IN3	8,54	1,10	4,60	(provient des précipitations)
IN4	4,68	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	41,42	3,05	37,16	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	2,80	0,85	5,48	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (20 pour cent))
OUT3	99,51	0,00	5,98	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,4)
OUT4	7,63	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	51,75	13,93	1,29	(3 tonnes/ha érosion)
Total	-144,9	33,3	-45,3	

Sorgho

Surface récoltée: 207 ha 189 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	10,00	4,35	0,00	(quantité raccomendée)
IN2	6,25	1,25	5,43	(1 pour cent du fumier disponible)
IN3	5,86	0,76	3,16	(provient des précipitations)
IN4	3,96	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	13,60	1,83	5,84	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	8,38	3,57	22,66	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (85 pour cent))
OUT3	24,24	0,00	2,96	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	3,39	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	80,96	35,20	7,88	(8 tonnes/ha érosion)
Total	-104,5	-34,2	-30,8	

Patate douce

Surface récoltée: 140 ha 1 341 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	17,00	7,39	14,47	(quantité raccomendée)
IN2	4,62	0,93	4,01	(0,5 pour cent du fumier disponible)
IN3	6,83	0,88	3,68	(provient des précipitations)
IN4	4,24	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	90,04	8,62	70,88	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	19,11	10,92	30,03	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (95 pour cent))
OUT3	23,52	0,00	7,50	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	4,26	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	73,60	22,00	5,35	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-177,8	-32,3	-91,9	

Théier

Surface récoltée: 1 092 ha 9 600 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	33,75	2,93	5,63	(quantité raccomendée)
IN2	0,00	0,00	0,00	(pas de fumier)
IN3	8,54	1,10	4,60	(provient des précipitations)
IN4	4,68	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	9,50	0,76	5,13	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	0,03	0,00	0,00	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (15 pour cent))
OUT3	30,29	0,00	6,96	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	6,20	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	17,25	4,64	0,43	(1 tonne/ha érosion)
Total	-16,3	-1,4	-2,3	

MALI, RÉGION CMDT DE KOUTIALA

Cotonnier

Surface récoltée: 144 713 ha 139 648 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	37,96	11,37	11,85	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	25,23	5,43	21,41	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	23,16	2,80	6,27	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	8,08	0,01	3,65	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (1+61 pour cent brûlis))
OUT3	38,26	0,00	9,89	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	9,00	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	7,59	2,31	0,28	(10 tonnes/ha érosion)
Total	-13,8	12,4	17,4	

Niébé

Surface récoltée: 5 637 ha 2 559 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	0,00	0,00	0,00	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	14,86	0,00	0,00	(non symbiotique + 55 pour cent de N fixé)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	11,62	1,36	0,32	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	8,63	0,50	4,99	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (100 pour cent))
OUT3	5,22	0,00	4,14	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,6)
OUT4	0,96	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	5,31	1,62	0,20	(7 tonnes/ha érosion)
Total	-11,5	-2,8	-5,4	

Jachère

Surface en jeu: 227 200 ha 0 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(pas d'engrais)
IN2	0,00	0,00	0,00	(l'apport de fumier est égal à l'exportation des résidus)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	0,00	0,00	0,00	(pas de production)
OUT2	0,00	0,00	0,00	(l'exportation des résidus est égale à l'apport de fumier)
OUT3	10,72	0,00	4,14	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	0,96	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,38	0,12	0,01	(0,5 tonne/ha érosion)
Total	-2,94	0,6	0,1	

Arachide

Surface récoltée: 13 411 ha 7 564 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	0,00	0,00	0,00	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	0,00	0,00	0,00	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	19,86	0,00	0,00	(non symbiotique = 65 pour cent de N fixé)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	18,84	0,96	3,95	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,84	0,46	6,40	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (81 pour cent))
OUT3	0,00	0,00	4,14	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	0,96	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	7,59	2,31	0,28	(10 tonnes/ha érosion)
Total	-7,0	-3,0	-10,5	

Maïs

Surface récoltée: 57 020 ha 98 188 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	27,12	3,88	6,34	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	7,18	1,54	6,09	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	23,59	3,79	3,62	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	16,39	2,07	25,76	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (80 pour cent))
OUT3	20,27	0,00	6,29	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,9)
OUT4	5,32	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	3,80	1,16	0,14	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-25,9	-0,9	-19,1	

Mil

Surface récoltée: 101 294 ha 87 012 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	5,38	0,72	1,37	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	0,35	0,07	0,29	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	16,49	5,12	4,66	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	9,51	0,94	20,55	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (52 pour cent))
OUT3	3,80	0,00	4,43	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	1,68	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	3,80	1,16	0,14	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-20,4	-5,7	-23,8	

Riz

Surface récoltée: 5 569 ha 6 850 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	5,48	0,52	1,00	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	0,04	0,01	0,03	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	11,76	4,77	0,58	(riz en vallées, 1 mm sédimentation par an)
OUT1	14,27	4,18	4,18	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,86	0,99	15,41	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (35 pour cent))
OUT3	9,98	0,00	4,32	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 0,5)
OUT4	1,66	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	0,00	0,00	0,00	(pas d'érosion, le riz est cultivé dans les vallées)
Total	-4,4	0,8	-18,0	

Sorgho

Surface récoltée: 130 254 ha 128 691 tonnes production

	N	P	K	
		(kg/ha)		
IN1	3,53	0,60	1,10	(apport d'engrais, des rapports CMDT)
IN2	0,05	0,01	0,04	(intrants engrais organiques, tirés des rapports CMDT)
IN3	5,40	0,72	4,27	(niveau global)
IN4	3,73	0,00	0,00	(seulement non symbiotique)
IN5	0,00	0,00	0,00	(non applicable)
OUT1	16,80	1,98	2,96	(production * teneur en éléments nutritifs)
OUT2	4,18	0,25	23,18	(production * teneur en éléments nutritifs * exportation résidus (51 pour cent))
OUT3	2,13	0,00	4,33	(formule lixiviation, profondeur d'enracinement = 1,0)
OUT4	1,41	0,00	0,00	(modèle de régression)
OUT5	3,80	1,16	0,14	(5 tonnes/ha érosion)
Total	-15,6	-2,1	-25,2	

Annexe 11

Résumés des présentations de l'atelier de 2003 à Nairobi sur les bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles

LE RÉSEAU AFRICAIN POUR LA BIOLOGIE ET LA FERTILITÉ DU SOL: NOUVEAUX DÉFIS ET OPPORTUNITÉS

La dégradation de la fertilité du sol a été décrite comme la contrainte la plus importante pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. Le déclin de la fertilité du sol n'est pas simplement un problème de carence en éléments nutritifs mais également un problème: a/ de variétés inadaptées et de conception inadéquate des systèmes de culture, b/ d'interactions avec des parasites et des maladies, c/ de liaison entre pauvreté et dégradation des terres, d/ de politiques nationales et globales souvent pernicieuses pour ce qui est des incitations et e/ d'échecs institutionnels. Par conséquent, aborder les questions de fertilité du sol exige une perspective à long terme et une approche holistique. Le Réseau africain pour la biologie et la fertilité du sol (African Network for Soil Biology and Fertility: AfNet) de l'Institut de la fertilité et de la biologie des sols tropicaux du CIAT est consacré à répondre à ce défi. Le but final d'AfNet est de renforcer et soutenir la capacité des parties prenantes intéressées à produire, partager et appliquer des connaissances et des savoir-faire de gestion de la fertilité du sol pour contribuer au bien-être des communautés d'exploitants agricoles. Ce réseau au niveau de l'Afrique a plus de 200 membres issus des services nationaux de recherche et de vulgarisation agricoles et des universités de diverses disciplines, principalement de sciences du sol, sciences sociales et échange de technologies. Cet article met en lumière les activités principales d'AfNet, qui incluent des activités de recherche en réseau sur le terrain, d'information et documentation, de formation et de renforcement des capacités.

Bationo, A., Kimetu, J., Ikerra, S., Kimani, S., Mugendi, D., Odendo, M., Silver, M., Swift, M.J. & Sanginga, N.

VÉRIFICATION ET SUIVI DES FLUX ET DES STOCKS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS POUR DÉTERMINER LES STRATÉGIES ADAPTÉES DE GESTION DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS POUR LES TERRES ARIDES ET SEMI-ARIDES

Le problème est la migration des populations des zones à potentiel élevé vers des zones à faible potentiel, migration qui a comme conséquence une pression

accrue sur la terre, avec des précipitations erratiques, une culture continue et donc une dégradation des terres, augmentant les problèmes de fertilité des sols et les diminutions de rendement des cultures. L'objectif principal du projet est d'identifier en collaboration étroite avec les exploitants agricoles les contraintes principales auxquelles font face les ménages sur une petite exploitation agricole dans les terres arides et semi-arides du Kenya, avec une prise en compte particulière des bilans d'éléments nutritifs. Un deuxième objectif est d'identifier, avec une méthode participative et des essais, les techniques alternatives de production qui diminueront les contraintes et contribueront à la mise en place de systèmes de production agricole plus durables. Le projet est effectif dans six villages avec différents systèmes de culture. L'approche NUTMON pour l'inventaire et le suivi est réalisée deux fois par saison (phase de diagnostic). Les résultats (habituellement bilans des éléments nutritifs, indicateurs économiques, etc.) de cette phase sont présentés aux exploitants agricoles pour évaluation et conception (mise en application en utilisant l'approche PLAR) des options pour résoudre les contraintes identifiées de fertilité du sol.

Gachimbi, L.N. & De Jager, A.

BILANS DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL PAR CLASSE D'EXPLOITATIONS AGRICOLES AU SUD MALI

La surexploitation des éléments nutritifs en Afrique subsaharienne est l'une des causes principales de la stagnation et du déclin des rendements. Afin d'améliorer la durabilité de la production agricole, plusieurs bilans d'éléments nutritifs ont été réalisés au sud Mali. Ces bilans fournissent des informations d'ordre général de valeur. Néanmoins, peu d'informations existent concernant l'impact des techniques employées par différentes catégories d'exploitants agricoles sur la fertilité de leurs sols. Cette étude a été effectuée dans deux villages (Noyaradougou et M'Peresso) et pour trois classes (catégories) d'exploitations agricoles allant de la classe 1 (bonne gestion de la fertilité du sol) à la classe 3 (mauvaise gestion). L'étude prévoit d'analyser la gestion des flux d'éléments nutritifs par différentes catégories dans les deux villages et d'appréhender les principales tendances de leur évolution sur une période de 3 à 4 années.

Dans les deux villages et pour toutes les classes, les bilans partiels de NPK (composants les plus visibles et les plus facilement mesurables dans les bilans d'éléments nutritifs) sont positifs pour le coton, contrairement au mil et au sorgho. Le même bilan pour le maïs dépend en grande partie de la stratégie de production et s'améliore de la classe 1 à la classe 3 dans les deux villages. Selon le village, les bilans partiels par exploitation agricole pour l'azote oscillent entre -2,5 et 12 kg/ha/an. Le bilan du phosphore est positif pour toutes les classes et les deux villages et varie de 2,9 à 6,6 kg/ha/an, alors que celui pour la potasse est habituellement déficitaire. Les bilans partiels au niveau de l'exploitation agricole se sont améliorés au long des années grâce à des niveaux plus élevés d'intrants en 1997 par rapport aux années précédentes, et à des rendements inférieurs pour les cultures et les résidus dans toutes les classes, sauf la classe 1 à Noyaradougou. Le bilan complet des éléments nutritifs prend en compte «ce qui est facile à mesurer» (éléments des

bilans partiels) et ce qui est difficile à mesurer (flux). Les bilans complets de N et de K sont négatifs. Le déficit en potassium est moins marqué à Noyaradougou, où le système de culture est basé en grande partie sur coton-maïs, qu'à M'Peresso, où le mil et le sorgho occupent 48 pour cent des systèmes de rotation avec le coton. Le bilan complet du phosphore est positif dans tous les cas.

Kanté, S., Smaling, E.M.A. & Van Keulen, H.

EXPÉRIENCES DE TRAVAIL AVEC LES COMMUNAUTÉS RURALES POUR OBTENIR UNE AMÉLIORATION DES BILANS DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL ET DE LA MATIÈRE ORGANIQUE

Des essais et des démonstrations dans les champs des exploitants agricoles ont montré qu'une fertilisation appropriée et d'autres technologies telles que le travail de conservation du sol peuvent fortement augmenter les rendements des cultures dans beaucoup de pays d'Afrique subsaharienne. Le défi est maintenant d'améliorer la disponibilité et l'accessibilité des engrais et autres technologies pour les communautés d'exploitants agricoles. Les bénéfices obtenus par l'amélioration de la distribution des intrants seraient plus grands si cette dernière était couplée avec des systèmes de gestion des cultures qui favorisent l'efficacité de l'emploi des engrais. La diminution du taux de matière organique du sol amène une dégradation du sol, ayant pour résultat des réponses faibles à l'engrais et donc une érosion de la rentabilité. Au cours des années, le Centre africain pour le développement des engrais a développé des programmes qui placent l'accent sur: l'appui à la fourniture d'engrais aux communautés, et la promotion de l'ISFM comportant l'utilisation des engrais chimiques, des matériaux organiques et d'autres facteurs d'amélioration des rendements.

Les résultats du travail avec les communautés rurales indiquent que l'assistance à l'approvisionnement en intrants et des procédures de gestion appropriées pour les exploitations agricoles peuvent améliorer considérablement les bilans des éléments nutritifs et les niveaux de matière organique du sol.

Muchena, S.C.

EFFET DE LA PRODUCTION DE CACAO SUR LE BILAN DES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL AU GHANA

Au Ghana, le cacao est produit par de petits exploitants avec un faible niveau de gestion. Ces agriculteurs n'emploient pas d'engrais. Ainsi, la production a tendance à diminuer au cours des années. Les principaux gains en éléments nutritifs sur l'exploitation agricole sont réalisés par la décomposition de la litière de feuilles de cacaoyer, qui apporte 119 kg/ha N, 8 kg/ha P et 22 kg/ha K au sol chaque année. Les principales pertes d'éléments nutritifs de l'exploitation agricole sont les productions récoltées. Basées sur le rendement annuel moyen de 300 kg/ha de cacao sec, les quantités annuelles des principaux éléments nutritifs enlevés au sol par la récolte des cabosses sont de 7,5 kg/ha N, 1,2 kg/ha P, 4,4 kg/ha K pour les fèves et 4,2 kg/ha N, 0,5 kg/ha P et 12,1 kg/ha K pour les restes de cabosses. Cette exportation, estimée pour une récolte commercialisable annuelle de 400 000 tonnes

de fèves de cacao sèches, est équivalente à 10 000, 1 640 et 5 840 tonnes de N, P et K respectivement, ce qui représente environ 6 pour cent de la quantité d'éléments nutritifs (NPK) rapportés au sol par la litière. La non utilisation d'engrais pour compléter le niveau des éléments nutritifs exportés par les récoltes sur de longues périodes pourrait être l'une des causes de la baisse de production du cacao au Ghana.

Ofori-Frimpong, K., Afrifa, A.A. & Appiah, M.R.

UNE MÉTHODE HIÉRARCHISÉE POUR ÉVALUER L'ÉROSION DU SOL ET MODÉLISER LE RISQUE SPATIAL

La thèse de doctorat intitulée: «Méthode hiérarchisée pour évaluer l'érosion du sol et modéliser le risque spatial: une étude de cas dans le district de Kiambu» par Peter F. Okoth a présenté une nouvelle méthode pour évaluer l'érosion du sol sur trois échelles d'un système au niveau du paysage. La méthode employée dans la thèse a identifié les exploitants agricoles comme bénéficiaires du plus bas niveau d'évaluation champ-parcelle, un groupe d'exploitants agricoles en tant que bénéficiaire du deuxième niveau, et des organismes gouvernementaux étant bénéficiaires du niveau le plus élevé, l'unité de paysage. Il semble important que l'exploitant agricole puisse contrôler les caractéristiques spatiales incluant: choix des cultures, couverture de la terre, et placement des cultures sur des positions particulières dans le paysage. Les sentiers et les frontières champ-parcelle doivent être gérés dans les bassins versants afin de limiter ou contrôler le problème de l'érosion du sol. Les routes, les zones construites, les établissements scolaires, les vallées de fleuve et les berges des rivières doivent être gérés au niveau le plus élevé d'unité de paysage. La méthode propose une approche interdisciplinaire des systèmes dans la gestion des risques d'érosion du sol impliquant des interventions, des politiques, des ressources, des caractéristiques de paysage, des processus, du temps, de l'énergie et de l'espace pour que chaque niveau devienne durable.

Okoth, P.F.

POURQUOI FAIRE DES BILANS D'ÉLÉMENTS NUTRITIFS DU SOL? QUELQUES ALTERNATIVES

Cet article critique les objectifs des bilans d'éléments nutritifs, passe en revue leurs limites, et suggère deux approches alternatives pour évaluer et mesurer les impacts des pratiques agricoles sur la productivité du sol. La première approche distingue l'entrée d'éléments nutritifs provenant: a/ des apports habituels (ressources organiques et engrais inorganiques solubles), qui dépendent de la gestion présente et b/ des éléments nutritifs stockés (movement lent du pool de matière organique du sol et de pools inorganiques adsorbés), qui dépendent des modes de gestion précédents. L'apport actuel d'éléments nutritifs est un indicateur sensible des effets de la gestion courante sur la productivité du sol à court terme (1 à 2 saisons). L'entrée «éléments nutritifs stockés» est un indicateur du pouvoir tampon et de la durabilité du sol pour ce qui est de la fourniture d'éléments nutritifs sur le long terme (20 ans). Les principales données exigées pour estimer ces indices sont:

a/ matière sèche et teneurs en éléments nutritifs des apports au sol de produits organiques et de litière, b/ quantités d'engrais inorganiques apportés et c/ teneur en carbone organique de l'horizon superficiel. Le cadre, adapté, est plus instructif que les budgets d'éléments nutritifs, pour mesurer des impacts potentiels des pratiques agricoles alternatives sur la productivité du sol à court et à long terme. Cependant, comme les budgets d'éléments nutritifs, les données d'entrée sont difficiles à collecter dans des enquêtes systématiques et sur de grandes zones, et le modèle a plusieurs hypothèses qui sont difficiles à valider.

La deuxième approche reconnaît que la capacité du sol à fournir des éléments nutritifs est seulement une dimension de la qualité des sols. Cela remplit un besoin d'indicateurs intégrés de qualité des sols qui prennent en compte d'autres dimensions de la capacité productive et de fonctionnement de l'écosystème, telles que la capacité d'infiltration, de stockage de l'eau et de résistance à l'érosion. De tels indicateurs doivent être facilement mesurables pour permettre la surveillance des impacts réels des pratiques agricoles alternatives sur la qualité du sol. À cet effet, le papier propose et démontre l'utilisation de la spectroscopie proche-infrarouge (SPIR) pour trouver des indicateurs intégrés de la qualité du sol qui soient directement en rapport avec la productivité des cultures et les processus d'enrichissement-épuisement du sol (par exemple apports organiques, érosion). Les indicateurs lents et écologiques sont sensibles à la variation naturelle et aux effets à long terme de la gestion mais pas au bruit des effets à court terme de gestion courante et de conditions environnementales. Cette technique non destructive permet de caractériser rapidement un grand nombre d'échantillons de sol (2 000 échantillons par semaine). L'article démontre l'intérêt de l'utilisation de la technique, en même temps que des déterminations d'isotope stable, pour évaluer les effets historiques du changement d'utilisation de la terre et les effets de la gestion sur la qualité du sol. Il montre comment l'utilisation de ces indicateurs spectraux en même temps que des techniques statistiques permet: (a) de séparer les effets de gestion des effets de corrélation spatiale et de bruit environnemental et (b) de mesurer les incertitudes des indicateurs de qualité de sol à différents niveaux d'agrégation. Les observations géoréférencées de l'index de qualité spectrale peuvent également être interpolées pour de grands secteurs (> 10^3 km^2) en employant l'imagerie satellitaire. Le papier montre également l'utilisation de la SPIR pour l'évaluation rapide de la qualité des ressources organiques.

Shepherd, K.D. & Walsh, M.G.

FONCTIONNEMENT DES GRADIENTS DE FERTILITÉ DES SOLS AU NIVEAU DE L'EXPLOITATION AGRICOLE ET IMPLICATIONS POUR LA GESTION INTÉGRÉE DE LA FERTILITÉ DES SOLS

La plupart des organismes de recherche et de développement agricoles acceptent le paradigme de l'ISFM comme indispensable pour développer et disséminer des options améliorées de gestion des sols. Techniquement, le paradigme de l'ISFM combine l'utilisation des intrants organiques et minéraux en même temps que les variétés adaptées. Bien que les bilans des éléments nutritifs en Afrique

subsaharienne se soient avérés déficitaires aux niveaux national et régional, quand on regarde au niveau de l'exploitation agricole, de grandes différences dans les bilans peuvent habituellement s'observer entre les champs, certains montrant un bilan positif. Ceci résulte principalement de la concentration des ressources disponibles, organiques et minérales, sur des champs proches de l'habitation. De telles méthodes de gestion, quand elles sont appliquées pendant de longues périodes, ont comme conséquence des différences substantielles dans le statut de fertilité du sol entre les champs dans une même exploitation agricole. La majeure partie du temps, ces différences prennent la forme de gradients, diminuant avec la distance à l'habitation. Alors que l'existence des gradients de fertilité du sol a été observée dans la plupart des zones d'Afrique subsaharienne, peu de choses sont connues sur la façon dont ces gradients affectent les processus qui fondent les pratiques d'ISFM, comme l'efficacité de l'emploi de l'engrais ou la décomposition de la ressource organique. Plusieurs hypothèses ont été formulées dans un effort de démêler les rapports entre le statut de fertilité du sol de différents champs et le fonctionnement des pratiques en matière d'ISFM mais peu d'informations sont disponibles pour évaluer ces hypothèses. Ce papier présente une stratégie pour déterminer les gradients de fertilité du sol, explorer les liens existant avec l'appréciation par les exploitants agricoles du statut de fertilité de leur sol, et donner des éléments préliminaires de réflexion par rapport aux hypothèses mentionnées ci-dessus. L'obtention de cette information devrait permettre de juger si les recommandations pour l'usage d'intrants doivent être affinées en tenant compte des gradients de fertilité du sol existant au niveau de l'exploitation agricole.

Vanlauwe, B.

ESTIMATION DES CHANGEMENTS DE PROPRIÉTÉS DES SOLS EN UTILISANT COMME BASE LE POIDS DE SOL

Des données de haute précision sont nécessaires pour quantifier exactement les changements induits par les stratégies de gestion intégrée des ressources naturelles (INRM), changements qui sont souvent de 20 pour cent ou moins. Ces changements sont détectables avec une méthode statistique correcte. Cependant, les erreurs systématiques (par opposition aux erreurs aléatoires) présentes dans les méthodes d'échantillonnage de sol et d'analyse de laboratoire produisent des données qui sont soit toujours plus grandes soit toujours plus petites que la moyenne réelle de l'échantillon. Ceci a eu comme conséquence une mauvaise évaluation des résultats d'expérimentations, y compris a/ une impossibilité de détecter les changements réels et b/ des indications de changements inexistants. Les données erratiques et souvent illogiques provoquées par une erreur systématique ont amené beaucoup de scientifiques du sol à croire que des changements des propriétés de sol ne peuvent pas être détectés ou mesurés de manière sûre. En raison des méthodes imprécises et du désintérêt des scientifiques, les changements des propriétés des sols résultant des stratégies d'INRM sont rarement évalués avec précision. Ceci retarde l'identification des interventions réussies à vulgariser

auprès des exploitants agricoles. Cette présentation examine la cause la plus répandue d'erreur systématique dans le prélèvement des sols: échantillonner un sol avec un intervalle donné de profondeurs et estimer les changements dans cet intervalle. Même les changements minimes de densité apparente, qui se produisent généralement pendant la durée d'un essai, qu'ils soient dus aux processus naturels ou aux interventions d'INRM, changent la masse d'un sol lors de l'échantillonnage à une profondeur donnée. Là où le sol a été compacté pendant la durée d'un essai, ceci a toujours comme conséquence une surestimation des stocks d'éléments nutritifs dans un intervalle donné de profondeur, tandis que là où le sol est décompacté, une sous-estimation se produit. Des erreurs de 10-15 pour cent ne sont pas rares. Des erreurs systématiques semblables peuvent être introduites dans les analyses de laboratoire. Quand elles sont combinées avec des erreurs de prélèvement de sol, de telles erreurs donnent des données trompeuses et induisent des conclusions incorrectes. L'échantillonnage du sol en masse (prise en compte de la densité) élimine les erreurs d'échantillonnage provoquées par le prélèvement par profondeur, mais exige des méthodes qui ne sont généralement pas utilisées. Ellert et Bettany (1995) ont conclu que «des publications récentes indiquent un manque sérieux et persistant de prise de conscience au sujet de l'influence de la masse de sol sur les estimations de stockage d'éléments nutritifs» - une conclusion qui s'applique également aux indices de disponibilité d'éléments nutritifs ou aux mesures de qualité des sols. L'adoption des procédures de prélèvement de sol en masse, avec des modifications mineures apportées aux procédures courantes de laboratoire, peut presque entièrement éliminer l'erreur systématique, accélérant ainsi l'identification des interventions prometteuses d'INRM.

Wendt, J.

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)
15. Bilans des éléments nutritifs du sol à différentes chelles – Application des méthodes ntermédiaires aux réalités africaines, 2005 (A, F)

Disponibilité: décembre 2005

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

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.

15

BULLETIN FAO ENGRAIS ET NUTRITION VÉGÉTALE

Bilans des éléments nutritifs du sol à différentes échelles

Application des méthodes intermédiaries aux réalités africaines

En utilisant des données de trois pays d'Afrique subsaharienne, ce rapport compare les approches de niveau global et détaillé pour la détermination des bilans d'éléments nutritifs du sol avec une approche innovante de niveau intermédiaire. Il met en avant la valeur additionnelle qu'une approche de niveau intermédiaire peut fournir du fait de son utilité pour les personnes intéressées au niveau intermédiaire en articulant et en ciblant les mesures spécifiques pour l'augmentation de la fertilité du sol, et du fait de sa validité comme point d'entrée pour les décideurs politiques et l'intervention du secteur privé.

ISBN 92-5-205237-2 ISSN 0259-6180

9 789252 052371

TC/M/Y5749F/1/11.05/1000