

Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols



Consortium Africain pour la Santé des Sols: Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols

André Bationo (AGRA), Thomas Fairhurst (TCCL), Ken Giller (WUR), Valerie Kelly (MSU), Rodney Lunduka (CABI), Abdoulaye Mando (IFDC), Paul Mapfumo (SOFECISA), George Oduor (CABI), Dannie Romney (CABI), Bernard Vanlauwe (IITA), Lydia Wairegi (CABI), Shamie Zingore (IPNI).

Édité par Thomas Fairhurst

© CAB International 2015

Veillez citer cette publication comme suit: Fairhurst, T. (ed) (2015) *Manuel de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols*. Consortium Africain pour la Santé des Sols, Nairobi.

Le présent ouvrage est diffusé sous une licence **Creative Commons Attribution 3.0 Unported**.

Creative Commons License



Vous êtes libre:

- de partager, de copier, de distribuer et de transmettre l'ouvrage
- de remixer, d'adapter l'ouvrage; et
- de faire un usage commercial de l'ouvrage.

Dans les conditions suivantes:

- **Attribution** – Vous devez citer cet ouvrage de la manière indiquée par l'auteur ou le concédant (mais non d'une manière qui suggérerait qu'il vous avalise ou autorise votre usage de l'ouvrage).

Étant entendu que:

- **Dérogation** – les conditions ci-dessus peuvent être levées si vous obtenez l'autorisation du titulaire du droit d'auteur.
- **Domaine public** – quand l'ouvrage ou l'un de ses éléments est dans le domaine public en vertu de la loi applicable, ce statut n'est en aucune façon affecté par la licence.
- **Autres droits** – les droits suivants ne sont en aucune façon affectés par la licence:
 - vos droits d'utilisation équitable, ou d'autres exceptions et limites aux droits d'auteur applicables;
 - les droits moraux des auteurs;
 - les droits que d'autres personnes peuvent avoir par rapport soit à l'ouvrage lui-même, soit à la façon dont l'ouvrage est utilisé, tels que les droits de publicité ou le droit à la vie privée.
- **Avis** – Pour toute réutilisation ou distribution de cet ouvrage, prière de clairement informer le lecteur des conditions de la licence de cet ouvrage (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

Limites de responsabilité

Bien que les auteurs aient fait de leur mieux pour que le contenu de cet ouvrage soit précis au moment de l'impression, il est impossible de couvrir tous les scénarios. Ces informations sont diffusées "telles quelles", sans garantie. Les auteurs et l'éditeur sont exonérés de toute responsabilité de perte de profit ou d'autres dommages causés, ou présumés ayant été causés directement ou indirectement par les lignes directrices présentées dans cet ouvrage.

A propos de l'éditeur

Le Consortium Africain pour la Santé des Sols (ASHC) a pour mission d'améliorer les moyens de subsistance des petits exploitants agricoles grâce à l'adoption d'approches de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS) qui optimisent l'efficacité et l'efficience de l'utilisation des engrais.

Les livres d'ASHC sont disponibles à des tarifs spéciaux pour les achats en grande quantité. Des éditions spéciales, les traductions en langues étrangères et des extraits peuvent également être disponibles.

ISBN: 9781780645278

Typographié par Thomas Fairhurst, avec SPi, Pondicherry, Inde

Table des matières

Avant-propos	vii
---------------------	------------

Remerciements	ix
----------------------	-----------

1 Introduction	1
-----------------------	----------

1.1 Introduction	2
1.2 Qu'est-ce que la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS)	2
1.3 Historique du manuel	2
1.4 A qui est destiné ce manuel?	3
1.5 Contributions	4

2 Pourquoi la GIFS?	5
----------------------------	----------

2.1 Introduction	6
2.2 Contexte	6
2.3 Développement des systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne	7
2.4 Cibler les technologies – des “solutions magiques” aux “solutions les mieux adaptées”	8
2.5 Conclusions	9
2.6 Liste d'ouvrages à lire	9

3 Les principes de la GIFS	12
-----------------------------------	-----------

3.1 Introduction	13
3.2 Historique des approches de la gestion de la fertilité du sol en Afrique sub-saharienne	13
3.2.1 Utilisation des engrais minéraux	14
3.2.2 Recours aux méthodes à faible apport d'intrants pour améliorer la fertilité des sols	15
3.2.3 Vers l'intégration de l'utilisation de l'engrais et de la matière organique	17
3.3 Définition de la GIFS	17
3.3.1 Utilisation d'engrais minéraux	20
3.3.2 Utilisation d'intrants organiques	20
3.3.3 Utilisation de germoplasme amélioré	20
3.3.4 Résultat de la combinaison de l'utilisation d'engrais, d'intrants organiques et de germoplasme	21
3.3.5 Importance de l'adaptation locale	22
3.3.6 Optimiser l'efficacité agronomique	23
3.3.7 Principes agronomiques sains	25
3.3.8 Principes économiques rationnels	25
3.4 Conclusions	26
3.5 Liste d'ouvrages à lire	27

4 Pratiques de gestion de la fertilité des sols

31

4.1 Introduction	32
4.2 Utilisation d'intrants organiques	32
4.2.1 Les matières organiques en tant que sources d'éléments nutritifs	32
4.2.2 Rôle de la matière organique du sol dans la fertilité des sols	34
4.2.3 Avantages et inconvénients des intrants organiques comme engrais	35
4.3 Utilisation d'engrais minéraux	35
4.3.1 Matières fertilisantes	36
4.3.2 Amendements du sol	40
4.4 Efficacité de l'utilisation d'engrais	43
4.5 Les '4Rs' de l'utilisation efficace des engrais	43
4.5.1 Le bon engrais	44
4.5.2 La bonne dose d'engrais	46
4.5.3 Le bon moment pour l'application d'engrais	46
4.5.4 La bonne méthode d'application de l'engrais de fonds	46
4.5.5 Un cinquième 'bon' pour l'utilisation des engrais en Afrique sub-saharienne – cibler les options les plus porteuses	47
4.6 Utilisation des engrais et environnement	47
4.6.1 Utilisation d'engrais et durabilité environnementale	48
4.7 Minimiser les pertes d'éléments nutritifs ajoutés	48
4.7.1 Erosion hydrique et éolienne	48
4.7.2 Lessivage	49
4.7.3 Pertes gazeuses par dénitrification et volatilisation	49
4.7.4 Gestion des résidus de cultures	50
4.8 Utilisation de germoplasme amélioré	50
4.8.1 Potentiel de rendement génétique	50
4.8.2 Résistance aux ravageurs et maladies	51
4.8.3 Efficacité d'utilisation des nutriments	51
4.8.4 Disponibilité et qualité du matériel de semis ou de plantation	51
4.8.5 Trouver et sélectionner des germoplasmes améliorés pour leur utilisation dans la GIFS	51
4.9 Exploiter les avantages des légumineuses fixatrices d'azote	52
4.9.1 Composantes d'une symbiose fixatrice d'azote	53
4.9.2 Nécessité d'inoculation avec des rhizobiums	53
4.9.3 Contributions des légumineuses à la fertilité du sol	54
4.10 Utilisation d'inoculum à champignons mycorhiziens arbusculaires	55
4.11 Autres pratiques de gestion de la fertilité des sols	56
4.11.1 L'agriculture de conservation (AC): une solution universelle?	58
4.12 L'agriculture biologique	59
4.13 Capacité d'adaptation des interventions	59
4.14 Economie	60
4.15 Conclusions	62
4.16 Liste d'ouvrages à lire	62

5. Cibler les options de la GIFS

74

5.1 Introduction	75
5.2 Analyse des systèmes d'exploitation agricole (FSA)	75

5.2.1 Historique des activités passées	78
5.2.2 Collecte de données biophysiques	79
5.2.3 Identification des systèmes d'exploitation agricole dominants dans chaque terroir	79
5.2.4 Typologie des agriculteurs	79
5.2.5 Ratio terre/main-d'œuvre	80
5.2.6 Évaluation des risques	81
5.3 Analyse des systèmes de culture	81
5.3.1 Inspection des champs	81
5.3.2 Estimation des écarts de rendement	82
5.3.3 Fréquence et calendrier des visites	82
5.3.4 Tenue des registres agricoles	82
5.3.5 Utilisation d'un calendrier cultural	82
5.3.6 Utilisation d'une budgétisation participative	83
5.4 Évaluation de la fertilité des sols	83
5.4.1 Flux de ressources entre les exploitations agricoles et à l'intérieur de celles-ci	83
5.4.2 Symptômes de déficience	86
5.4.3 Plantes révélatrices	86
5.4.4 Échantillonnage des sols	86
5.5 Marchés et facteurs socio-économiques	88
5.5.1 Environnement politique et rôle des gouvernements	88
5.5.2 Les marchés	90
5.6 Développement des marchés	94
5.7 Analyse <i>ex ante</i> des performances de la technologie de la GIFS	95
5.7.1 Efficacité agronomique	97
5.7.2 Incitations économiques	97
5.7.3 Performance du marché	98
5.7.4 Données requises pour des analyses <i>ex ante</i>	99
5.8 Expérimentation des technologies GIFS en milieu paysan	102
5.9 Analyses <i>ex post</i> des performances de la technologie GIFS	102
5.10 Ajustement de l'adoption des solutions GIFS	102
5.10.1 Développement d'une stratégie de communication	103
5.11 Élaboration de matériel de vulgarisation	103
5.11.1 Communiquer directement avec les agriculteurs	104
5.11.2 Prestataires de services de vulgarisation	104
5.11.3 Type de médias	105
5.12 Utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC)	105
5.12.1 Téléphones portables	106
5.12.2 Ordinateurs pour l'accès à Internet	107
5.12.3 Vidéo	107
5.12.4 Stockage de données	108
5.13 Conclusions	109
5.14 Liste d'ouvrages à lire	109

6. Sols et production agricole – une introduction

119

6.1 Introduction	120
6.2 Fonctions et qualités du sol y compris les indicateurs de qualité	120
6.2.1. Fonctions de base du sol	120

6.2.2. Fertilité des sols	121
6.3 Le sol comme source d'eau et de nutriments pour la production des cultures	121
6.3.1. Fraction minérale	122
6.3.2. Fraction organique	124
6.4 Fonction des nutriments dans la production végétale	125
6.4.1. Macronutriments	125
6.4.2. Oligoéléments	127
6.5 Définition de la fertilité du sol	129
6.6 Mesure de la fertilité des sols	129
6.7 Conclusions	130
6.8 Liste d'ouvrages à lire	130

7. Tableaux et Informations de référence 133

7.1 Introduction	134
7.2 Echantillonnage du sol	134
7.3 Comment déterminer la densité apparente du sol	135
7.4 Comment déterminer la texture du sol dans un champ	136
7.5 Analyse des systèmes d'exploitation agricole	137
7.6 Gestion de la fertilité des sols	140
7.7 Nutrition des cultures	145
7.8 Utilisation d'engrais	150
7.9 Agronomie des cultures	155
7.10 Economie des exploitations agricoles	156
7.11 Généralités	156
7.12 Liste d'ouvrages à lire	157

Glossaire 159

Sigles et abréviations 164

Index 166

Avant-propos

Plusieurs pays africains continuent de faire face à de nombreux épisodes de famines et à une faible productivité agricole. Avec une population toujours croissante, les agriculteurs cultivent de plus en plus la même terre d'années en années. Dans de telles conditions, la fertilité des sols baisse, si les nutriments utilisés par les cultures ne sont pas restitués au sol. Pour y remédier, les engrais minéraux sont essentiels. Mais comme les engrais coûtent plus chers en Afrique que nulle part ailleurs dans le monde, la plupart des agriculteurs n'en utilisent pas. En réponse, plusieurs pays ont subventionné les engrais, et ce souvent en négligeant la promotion des pratiques agricoles conséquentes, et le développement d'un environnement institutionnel et politique encourageant. L'augmentation de la productivité des petits exploitants exige une bonne compréhension des écarts de rendement (c'est-à-dire les différences entre les rendements réels obtenus, les rendements réalisables et les rendements potentiels dans les conditions économiques actuelles), ainsi que des facteurs limitatifs biophysiques et socio-économiques qui empêchent d'optimiser les résultats.

La Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols, communément appelée GIFS, est présentée dans ce manuel comme un facteur clé d'amélioration de la faible productivité des sols et des cultures en Afrique, surtout pour les principales cultures vivrières de base, à savoir: le maïs, les haricots, le riz, le manioc, les bananes, le sorgho, le mil et les autres cultures. Dans ce contexte, la GIFS est définie comme étant un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol, y compris l'utilisation intégrée d'engrais minéraux, d'intrants organiques et de germoplasmes améliorés, combinée avec les connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales, en vue d'optimiser l'utilisation agronomique efficace des nutriments appliqués et par conséquent l'accroissement du rendement des cultures. Dans cette définition, tous les intrants doivent être gérés suivant des principes agronomiques et économiques rationnels. La GIFS ne peut pas réussir si elle n'est pas appuyée par les gouvernements, responsables des importations d'engrais; par un service de vulgarisation efficace, essentiel pour apporter la technologie aux agriculteurs; ainsi que par un secteur privé d'agro-distributeurs dynamiques, apte à garantir la disponibilité et la distribution efficace des engrais et des semences

Au cours des dix dernières années, plusieurs initiatives de recherche financées par des fonds publics ont été menées sur la GIFS dans toute l'Afrique sub-saharienne. Les travaux sur la GIFS ont principalement fait l'objet de rapports et d'articles scientifiques publiés dans des revues professionnelles évaluées par des pairs. L'idée d'un manuel pratique sur la GIFS est née lors de l'évaluation des besoins et des concertations menées en préparation d'un dossier de demande de subvention auprès de la Fondation Bill & Melinda Gates par CABI. Le concept d'un consortium africain pour la santé des sols (Africa Soil Health Consortium - ASHC) avait déjà été proposé par un groupe d'experts en GIFS lors d'une réunion de consultation qui s'est tenue à Wageningen, aux Pays-Bas, en 2010. Ces experts constituent le noyau du groupe technique consultatif qui fournit à la fois des conseils et un appui technique pour accompagner la production des matériels de vulgarisation de la GIFS, tels que le présent manuel. Ce dernier se veut d'être une synthèse de l'apprentissage accumulé en matière de GIFS, dans une publication pouvant être utilisée pour former des praticiens.

La production de ce manuel et d'autres matériels d'apprentissage dans le cadre du consortium ASHC a été financée par la Fondation Bill & Melinda Gates. Ce financement engage le consortium coordonné par CABI à collaborer avec des experts pour élaborer les principaux documents de référence sur les principes GIFS (appelés produits de Niveau 1) en versions anglaise, française et portugaise. C'est ce qui a abouti à la production du présent manuel. La première réunion consultative sur ce livre a eu lieu en mai 2011 lors du lancement du projet à Nairobi, au Kenya.

L'essentiel du travail d'élaboration du manuel fut réalisé lors d'un atelier de rédaction qui a eu lieu à Nairobi, en octobre 2011 et qui a réuni les principaux auteurs et Thomas Fairhurst, le rédacteur technique de ASHC. En novembre 2011, Paul Van Mele (Agro-Insight), a visité six pays d'Afrique de l'Ouest, du Centre et de l'Est pour réaliser un film (avec narration en anglais, français et portugais) qui reflète les principes de la GIFS abordés dans le manuel et illustrés par les images des systèmes de culture prioritaires du projet. Le film peut être visionné en ligne à l'adresse <http://www.cabi.org/ashc>.

Cet ouvrage est destiné à la formation des vulgarisateurs sur les techniques de Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols en Afrique sub-saharienne et des agents impliqués dans le développement rural qui souhaiteraient en savoir plus sur les principes et pratiques GIFS. Le présent manuel se veut également une introduction pratique à la GIFS pour les institutions d'enseignement, telles que les universités et les collèges techniques, les organisations impliquées dans l'élaboration des politiques agricoles et de développement rural qui ont besoin de ces matériaux de référence sur les techniques GIFS, ainsi que d'autres organisations gouvernementales et non gouvernementales (ONG) qui cherchent à mettre en œuvre la GIFS.

Ce manuel GIFS est divisé en sept sections: une introduction, la nécessité de la GIFS, les principes de la GIFS, les pratiques de la gestion de la fertilité, le ciblage des options GIFS, une introduction au sol et à la production agricole et une section contenant des tableaux, des définitions et des informations de référence. Toute l'équipe du projet, y compris le groupe technique consultatif, espère que le lecteur trouvera dans ce manuel un outil utile pour l'accompagner dans la gestion de la fertilité des sols en Afrique et ailleurs où des facteurs de production semblables sont en jeu

Signé:

Peter Okoth (CIAT)	Shamie Zingore (IPNI)	Andre Bationo (AGRA)	Thomas Fairhurst (TCCL)
Ken Giller (WUR)	Rebbie Harawa (AGRA)	Jeroen Huising (CIAT)	Bashir Jama (AGRA)
Richard Jones (IFDC)	Valerie Kelly (MSU)	Abdoulaye Mando (IFDC)	Paul Mapfumo (SOFECSA)
Paul Van Mele (Agro-Insight)	Kabirou Ndiaye (AfricaRice)	George Oduor (CABI)	Bell Okello (ICRW)
Bernard Vanlauwe (IITA)			

Remerciements

La préparation du présent manuel a été financée par la Fondation Bill & Melinda Gates.

Les auteurs tiennent à remercier Simon Ndonge pour les merveilleuses illustrations, Leonard Rusinamhodzi pour la préparation du glossaire et Priscilla J. B. Sharland pour la relecture du texte. Nos remerciements s'adressent également aux organisations suivantes pour le temps que les auteurs ont bien voulu consacrer à la rédaction des différents chapitres du manuel (par ordre alphabétique).

1. Alliance pour une Révolution Verte en Afrique (AGRA)
2. CAB International (CABI)
3. Centre International pour Développement des Engrais (IFDC)
4. Consortium d'Afrique Australe pour la Fertilité des Sols (SOFECSA)
5. Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA)
6. Institut International pour la Nutrition des Plantes (IPNI)
7. Tropical Crop Consultants Ltd (TCCL)
8. Université d'Etat du Michigan (MSU)
9. Université de Wageningen (WUR)

Les photographies utilisées dans ce manuel ont été fournies par André Bationo, Ken Giller, Bernard Vanlauwe, Thomas Fairhurst, Paul Mapfumo, Shamie Zingore, Abdoulaye Mando, Pablo Tiftonell, Lydia Wairegi et George Oduor.

Certaines des données utilisées proviennent de ressources publiées.

Les tableaux 7.2–7.4, 7.6–7.33, 7.36, 7.38, 7.39, 7.41 et 7.42 ont été reproduits de *Soil Fertility Kit*, avec l'aimable autorisation d'IPNI.

A propos de CTA

Le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA) est une institution internationale conjointe de l'Union Européenne (UE) et du Groupe des Etats d'Afrique, des Caraïbes et du Pacifique (ACP). Le CTA intervient dans les pays ACP pour améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, accroître la prospérité dans les zones rurales et garantir une bonne gestion des ressources naturelles. Il facilite l'accès à l'information et aux connaissances, favorise l'élaboration des politiques agricoles dans la concertation et renforce les capacités des institutions et communautés concernées.

Le CTA opère dans le cadre de l'Accord de Cotonou et est financé par l'UE.

Pour plus d'information sur le CTA, visitez www.cta.int/fr

1 Introduction



1.1 Introduction

Dans cette section, nous allons définir la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS), expliquer pourquoi nous avons ressenti le besoin du présent manuel, et décrire comment il peut être utilisé en vue du développement des systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne.

1.2 Qu'est-ce que la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS)?

Dans cette publication, nous définissons la GIFS comme étant:

Un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol qui impérativement passent par l'utilisation d'engrais, d'intrants organiques et de germoplasme amélioré, combinée avec les connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales, pour l'optimisation de l'efficacité agronomique des nutriments appliqués et l'accroissement du rendement des cultures. La gestion de tous les intrants doit se fonder sur des principes agronomiques et économiques rationnels.

1.3 Historique du manuel

Au cours des 10 dernières années, beaucoup de recherches financées par le secteur public ont été réalisées sur la GIFS à travers l'Afrique sub-saharienne. Les travaux sur la GIFS ont essentiellement fait l'objet de rapports et d'articles scientifiques publiés dans des revues professionnelles évaluées par des pairs. L'idée d'un guide pratique sur la gestion intégrée de la fertilité du sol est née lors de l'évaluation des besoins et des consultations menées en préparation d'un dossier de demande de subvention auprès la Fondation Bill & Melinda Gates par CABI. Les experts qui ont pris part à ces consultations sont devenus le noyau du groupe technique consultatif, qui fournit à la fois des conseils et un appui technique pour appuyer la production des matériels de vulgarisation GIFS, tels que le présent guide. Ce dernier se veut d'être une synthèse de l'apprentissage accumulé en matière de GIFS, dans une publication pouvant être utilisée pour former des praticiens.

Le financement fourni par la Fondation Bill & Melinda Gates engage l'ASHC à collaborer avec des experts pour élaborer les principaux documents de référence sur les principes de la gestion intégrée de la fertilité du sol (appelés produits de Niveau 1) dans un format prêt pour l'impression en versions anglaise, française et portugaise. Dans la demande adressée à la fondation, l'ASHC s'engage également à produire un film de haute qualité pour diffusion, en veillant à ce que les messages soient communiqués de façon efficace et traduits dans ces mêmes trois langues.

L'essentiel du travail d'élaboration de ce manuel a été réalisé lors d'un atelier de rédaction qui a eu lieu à Nairobi en octobre 2011. L'ASHC a organisé une réunion d'experts GIFS du conseil technique consultatif avec les cadres de CABI, membres du groupe d'exécution du projet.

Le groupe d'experts a d'abord élaboré les grandes lignes du projet qui ont été finalisées au cours de cette réunion. L'atelier de rédaction fut un processus collaboratif au cours duquel les participants rédigeaient d'abord et commentaient ensuite le travail des collègues, afin d'arriver à un consensus sur la forme et le fond du texte final. Thomas Fairhurst, rédacteur technique de l'ASHC, a piloté ce processus et a révisé le texte du manuel.

En novembre 2011, Paul Van Mele (Agro-Insight), a visité six pays d'Afrique de l'Ouest, du Centre, et de l'Est pour réaliser un film (avec narration en anglais, français et portugais) qui aborde les principes de la GIFS. Dans ce film, il a inclus les différentes pratiques que l'on trouve dans les systèmes de culture prioritaires du projet:

- maïs/légumineuses;
- riz irrigué et de bas-fonds;
- sorgho/mil/haricot à œil noir;
- banane/café; et
- systèmes basés sur le manioc.

Il a également réalisé un film pour expliquer aux décideurs politiques pourquoi et comment le soutien au développement et à la diffusion de la GIFS est important pour l'amélioration des moyens d'existence des petits exploitants agricoles en Afrique sub-saharienne.

Conformément à la politique de ASHC, le présent ouvrage est diffusé sous une licence "Creative Commons Attribution 3.0 Unported" (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>). Cette licence autorise le public à utiliser l'ouvrage à des fins non commerciales sans autorisation préalable, à condition que ASHC soit cité comme source.

1.4 A qui est destiné ce manuel?

Ce manuel est destiné à la formation des vulgarisateurs sur les techniques de gestion intégrée de la fertilité du sol en Afrique sub-saharienne et des agents impliqués dans le développement rural qui souhaiteraient en savoir plus sur les principes et pratiques de la GIFS.

Le présent guide se veut également une introduction pratique à la GIFS pour les institutions d'enseignement, telles que les universités et les collèges techniques, les organisations impliquées dans l'élaboration des politiques agricoles et le développement rural qui ont besoin de ces matériaux de référence sur les techniques GIFS, ainsi que d'autres organisations gouvernementales et non gouvernementales (ONG) qui cherchent à mettre en œuvre la GIFS. Ce guide est défini par ASHC comme étant de **Niveau 1** ou un matériel de référence principal sur les principes GIFS (Figure 1.1). Il a été préparé en se basant sur une revue des articles publiés, de la littérature grise et des matériels de vulgarisation déjà existants. ASHC envisage de produire un document de référence principal de **Niveau 2** sur les grands types de systèmes de culture en Afrique sub-saharienne qui incorpore les principes et pratiques GIFS. Des matériels de vulgarisation de **Niveau 3** adaptés aux conditions locales seront également produits en collaboration avec les services de vulgarisation et les ONG, qui œuvrent au niveau local dans les pays choisis.

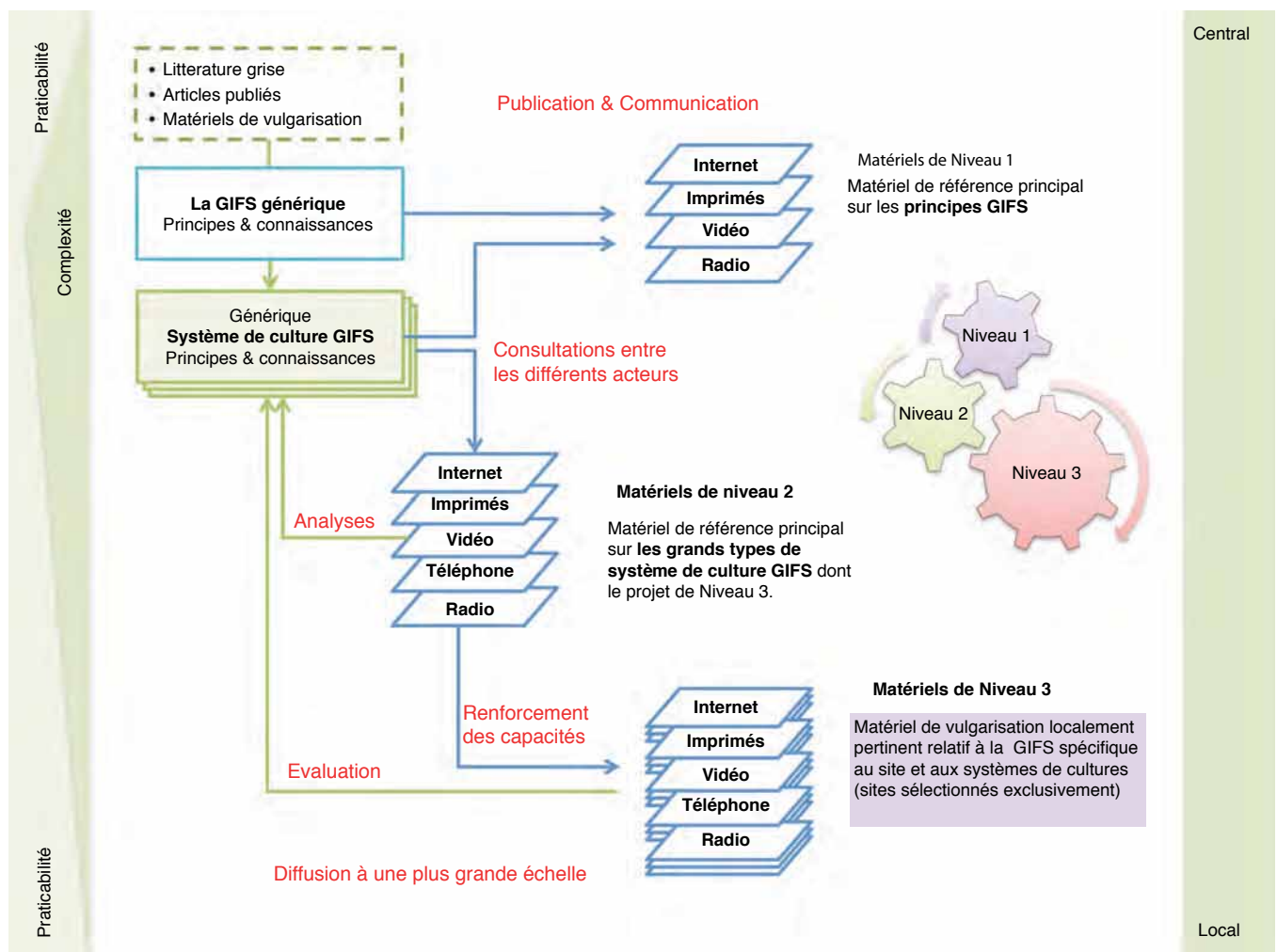


Figure 1.1 Processus de préparation de matériels de vulgarisation de la GIFS dans des systèmes de culture courants.

1.5 Contributions

La production de ce manuel n'aurait pas vu le jour sans l'appui de la Fondation Bill & Melinda Gates.

ASHC tient également à remercier les personnes ci-après dont la généreuse disponibilité a permis que cet ouvrage soit une réalité. Grâce à leur concours, les connaissances techniques ont été adaptées aux contextes locaux des différents groupes d'utilisateurs.

Les membres du Conseil technique consultatif

- André Bationo, Alliance pour une Révolution Verte en Afrique (AGRA)
- Thomas Fairhurst, Tropical Crop Consultants Ltd (TCCL)
- Ken Giller, Université de Wageningen (WUR)
- Valerie Kelly, Université d'Etat du Michigan (MSU) avec l'appui de l'Agence américaine pour le développement (USAID)
- Shamie Zingore, Institut International de la Nutrition des Plantes (IPNI)
- George Oduor, CABI
- Bernard Vanlauwe, Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA)
- Paul Van Mele, Agro-Insight
- Abdoulaye Mando, Centre international pour la fertilité des sols et le développement agricole (IFDC)
- Paul Mapfumo, Consortium d'Afrique Australe pour la Fertilité des Sols (SOFECSA)
- Shamie Zingore, Institut International d'Agriculture Tropicale (IPNI)

Equipe d'exécution du projet d'ASHC

- Rodney Lunduka, CABI
- George Oduor, CABI
- Dannie Romney, CABI
- Lydia Wairegi, CABI

Pour les informations biographiques et les coordonnées de ces personnes, veuillez visiter: www.cabi.org/ashc ASHC remercie toute personne ayant contribué par des idées et retours d'informations à la réussite de ce processus collaboratif.

2 Pourquoi la GIFS?



2.1 Introduction

Dans cette section, nous définissons d'abord le contexte et la pertinence de ce manuel, et nous expliquons ensuite pourquoi nous devons passer de la "solution magique" aux "solutions les mieux adaptées" fondées sur les principes de la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS) en vue du développement des systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne.

2.2 Contexte

Au cours des quarante prochaines années, il est prévu que la population de l'Afrique sub-saharienne augmentera de 700 millions d'habitants. Cela se traduira par un accroissement massif des besoins en alimentation humaine et animale, en fibres et en carburant, dans une région où plusieurs pays importent déjà des quantités importantes de denrées alimentaires. Comment peut-on accroître la production en alimentation humaine et animale, en fibres et en carburant? Bien qu'il soit probable que l'expansion des terres mises en culture se poursuive, il y a beaucoup de pressions concurrentes sur les terres pour le développement urbain et pour l'avancée du désert. Au regard du rendement actuel des cultures, il y a un grand potentiel d'accroissement de la production agricole grâce à l'intensification de l'exploitation des terres déjà en culture.

L'intensification du rendement concerne habituellement l'accroissement du rendement des cultures, mais peut aussi porter sur l'augmentation du nombre de cultures cultivées dans chaque champ chaque année. En plus d'épargner la terre pour d'autres usages, l'intensification du rendement a l'avantage d'accroître la rentabilité de la main-d'œuvre (c'est-à-dire réduire le poids des investissements à forte intensité de main-d'œuvre avec une faible rentabilité), et d'augmenter l'autosuffisance alimentaire et les revenus des agriculteurs. La plus grande partie des besoins alimentaires continueront d'être pris en charge par les petits exploitants qui représentent environ 70% de la population de l'Afrique sub-saharienne.

Le terme 'petit exploitant' est un terme générique qui englobe une grande diversité de types d'exploitation au sein d'une myriade de systèmes de culture. Nous pouvons faire la distinction entre deux types de petits exploitants:

- Les agriculteurs engagés dans la production agricole et l'élevage destinés à la vente sur les marchés locaux; et
- Les agriculteurs engagés dans l'exploitation agricole soit pour leur sécurité alimentaire, soit comme une activité d'appoint complémentaire à leurs moyens d'existence basés sur un emploi ou une petite activité commerciale.

Dans les deux types d'exploitation, l'amélioration de la fertilité du sol peut contribuer à l'accroissement des rendements, mais les méthodes appropriées à cette amélioration peuvent être très différentes. Par exemple, les agriculteurs qui produisent pour les marchés sont généralement en meilleure position pour emprunter de l'argent auprès des banques et investir dans des intrants (semences améliorées, engrais, produits agrochimiques) en comparaison aux agriculteurs qui ne produisent que pour la consommation locale, qui pourraient ne pas être en mesure d'obtenir un crédit pour acheter des intrants et qui sont souvent réticents à prendre le risque d'investir dans des intrants agricoles. Pour cette raison, la GIFS met l'accent sur l'adaptation des principes avérés de gestion de la fertilité des sols à la situation et aux objectifs du paysan (c'est-à-dire production pour le marché ou pour la consommation locale).

L'amélioration de la productivité agricole par les petits exploitants – communément appelée 'révolution verte' – a soutenu le développement économique auquel on a assisté au cours des cinquante dernières années en Asie. Le développement industriel a eu lieu, mais la sécurité alimentaire s'est maintenue au niveau régional et souvent national, et les petits exploitants tirent maintenant profit des marchés élargis pour leurs produits dans des villes en croissance rapide. La révolution verte a focalisé l'attention sur l'amélioration de la productivité dans les systèmes à base de riz de bas-fonds, souvent irrigués, où la variabilité entre les exploitations est beaucoup moindre par rapport à celle entre exploitations et paysages qu'on trouve en Afrique sub-saharienne. L'accent a été mis sur l'application à grande échelle de technologies prometteuses qui peuvent être mises en œuvre de façon efficace sur de grandes zones.

Tel que nous allons le voir, le développement des systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne requiert des technologies et des approches d'amélioration de la productivité très différentes de celles utilisées avec succès dans les systèmes d'exploitation agricole principalement irrigués d'Asie. Néanmoins, certaines caractéristiques sont communes aux deux régions, notamment en ce qui concerne le rôle de l'Etat en tant que:

- **moteur principal** d'amélioration de la productivité agricole des petites exploitations;
- **source de financement** des infrastructures et des institutions requises pour une meilleure intégration des agriculteurs dans les marchés des intrants (c'est-à-dire engrais, semences, produits agrochimiques et crédit) et des extrants; et
- **source de recherche et de vulgarisation** visant la diffusion des informations sur les technologies de gestion de la fertilité des sols, adaptées à divers types d'exploitants.

La GIFS a le plus grand potentiel d'impact en Afrique sub-saharienne dans les zones où:

- il y a un besoin d'intensification de la production des cultures en raison d'une population élevée et croissante;
- les agriculteurs ont accès aux marchés pour leurs produits.

2.3 Développement des systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne

Kofi Annan, l'ancien secrétaire général de l'ONU, a appelé à "une révolution verte authentiquement africaine au 21^{ème} siècle", qui reconnaît la riche diversité des peuples, des sols et des pratiques en Afrique, ainsi que le besoin urgent d'accroître la productivité agricole. Mais comment pouvons-nous développer et cibler les technologies GIFS pour améliorer la productivité étant donné la grande diversité et l'hétérogénéité des systèmes d'exploitation agricole africains?

L'agriculture africaine est très variée, avec de grands systèmes d'exploitation agricoles correspondant à chacune des principales zones agro-écologiques. En faisant un gros plan sur chacune des grandes classes de systèmes de culture, nous trouvons un autre degré d'importante variabilité à des niveaux plus locaux. Au sein d'un pays ou d'une région donnée, il y a aussi des différences de précipitations plus localisées, et de larges différences entre régions en termes socio-économiques et d'accès aux marchés. Même jusqu'au niveau des villages, il y a une grande diversité des conditions de vie des agriculteurs qui diffèrent en termes d'objectifs de production, de richesse et de dotation en ressources.

L'essentiel de l'hétérogénéité au sein des systèmes d'exploitation agricole est causé par une variabilité spatiale de la fertilité des sols, relevant de deux facteurs:

- Premièrement, les différences inhérentes dues à la roche mère à partir de laquelle le sol a évolué et la position dans le paysage qui influe sur la façon dont le sol se développe. Ensemble, souvent on les appelle 'pédo-paysage'. Une grande partie des sols d'Afrique provient des plus vieilles terres du monde dans lesquelles très peu de nutriments restent. Là où on trouve des sols plus jeunes volcaniques, ils sont plus riches en nutriments, mais pourraient présenter d'autres problèmes de fertilité du sol, tels que la fixation du phosphore dans des formes qui ne sont pas facilement accessibles par les cultures.
- Deuxièmement, la gestion passée par les agriculteurs a une influence majeure sur la fertilité du sol. Dans une agriculture itinérante, ou dans un système de jachère, la fertilité du sol d'un champ sera influencée par le temps pendant lequel il a été mis en culture depuis la dernière période de jachère et la durée de cette période. Dans des champs exploités intensivement, la quantité et la qualité du fumier organique et des engrais qui ont été ajoutés aux sols dans le passé détermineront l'état actuel de la fertilité de ces sols. Si le fumier est seulement appliqué dans des champs qui sont à proximité de la maison familiale, on observe d'importants gradients de fertilité du sol et celle-ci généralement baisse au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la maison.

Les petites exploitations ne sont pas toujours tournées vers le marché. Alors que certaines familles "vivent" de l'agriculture, d'autres gardent la terre familiale pour d'autres raisons (par exemple, un "lieu d'habitation", une assurance sociale) et considèrent l'agriculture comme une activité secondaire. Beaucoup de familles rurales africaines se trouvent en dessous du seuil de pauvreté et cultivent des terres déjà dégradées. Il est trop simpliste de supposer que le fait de promouvoir l'utilisation des intrants agricoles à travers des politiques de prix ou de subventions stimulera la productivité

de façon automatique et durable, et améliorera les moyens de subsistance. Ceci est particulièrement le cas lorsque les familles rurales disposent de diverses sources de revenus et espèrent éventuellement quitter l'agriculture à un moment donné dans l'avenir.

Toutes les technologies d'amélioration des sols ont un coût en termes de main-d'œuvre et de terre. De plus, sachant que les engrais minéraux et la matière organique sont de rares ressources en nutriments, la GIFS se concentre sur la façon d'assurer leur gestion efficace. L'approche abordée dans ce manuel représente un changement notable au niveau des concepts, qui s'éloigne de l'idée des 'recommandations d'ordre général' en matière de fertilisants. Par contre, l'accent est mis sur la façon de cibler les technologies GIFS adaptées aux différents agriculteurs et aux différentes cultures dans leurs champs.

Nous proposons de simples "règles pratiques" qui procèdent des principes scientifiques et des connaissances locales des agriculteurs, et qui ont été testées soigneusement sur le terrain.

2.4 Cibler les technologies – des "solutions magiques" aux "solutions les mieux adaptées"

Il est évident que les "solutions toutes faites" ou "solutions magiques" qui peuvent être appliquées à travers de vastes régions n'existent pas en Afrique sub-saharienne. Par contre, les technologies doivent être adaptées aux systèmes d'exploitation agricole et aux exploitations tout en reconnaissant leurs environnements agro-écologiques et socio-économiques, c'est-à-dire aux différentes "niches socio-écologiques". Au lieu donc de parler de paniers



de technologies “prometteuses”, nous préférons parler de technologies GIFS localement adaptées en tant qu’options les “mieux adaptées”.

- Les **solutions toutes faites** ou les **solutions magiques** tentent une mise en œuvre d’une approche donnée à grande échelle sans adaptation à la situation locale.
- Les **solutions prometteuses** sont adaptées à certaines situations.
- Les **solutions les mieux adaptées** sont spécifiquement adaptées à la situation locale.

Les nouvelles approches au problème de la faible fertilité des sols utilisent les principes GIFS en reconnaissant que:

- Ni les pratiques basées uniquement sur les engrais minéraux, ni celles uniquement basées sur les matières organiques ne suffisent pour une production agricole pérenne;
- Un germoplasme bien adapté, résistant aux maladies et aux ravageurs est nécessaire pour utiliser de façon efficiente les nutriments;
- Les bonnes pratiques agronomiques en termes de calendrier de semis, de densité de semis et de sarclage sont essentielles pour garantir une utilisation efficiente des rares ressources en nutriments.

En plus de ces principes nous reconnaissons:

- la nécessité de cibler les ressources en nutriments au sein des cycles de rotation des cultures, allant au-delà des recommandations pour des monocultures; et
- l’importance d’intégrer l’élevage dans les systèmes agricoles.

En dépit des changements majeurs au niveau de la philosophie du développement durable de l’agriculture en Afrique, la mise en œuvre de nouvelles idées et approches reste encore problématique. La diffusion d’informations auprès des agents de développement agricole (ONG, vulgarisateurs) est lente et la plupart des informations disponibles dans l’administration publique des pays d’Afrique sub-saharienne datent de plusieurs décennies. La diversité des conditions locales en terme de développement économique et d’infrastructures, ainsi qu’au niveau de l’agro-écologie, met en exergue la nécessité d’approches les mieux adaptées pour les services de diffusion d’informations.

Dans l’élaboration des lignes directrices, le processus de prise de décisions peut être divisé en trois horizons temporels:

- Les **décisions opérationnelles** concernent la gestion à court terme et journalière d’une exploitation agricole en ce qui concerne la météo, le développement des cultures, les besoins alimentaires du bétail, etc.
- Les **décisions tactiques** portent sur le moyen terme, elles peuvent concerner le choix des cultures à cultiver dans un champ donné au cours d’une saison donnée, et la sélection des méthodes de production en fonction de l’organisation de la ferme.
- Les **décisions stratégiques** concernent le long terme, il peut s’agir de l’organisation de l’exploitation en rapport avec les dotations en terre, main-d’œuvre et capitaux d’investissement, et en relation avec l’orientation de la production en termes de choix de rotations des cultures, et l’investissement dans différents types d’élevage.

2.5 Conclusions

Dans la prochaine section, nous allons expliquer ce qu’est la gestion intégrée de la fertilité des sols et comment elle peut être utilisée pour accroître la productivité des systèmes d’exploitation agricole en Afrique sub-saharienne.

2.6 Liste d’ouvrages à lire

Cette liste sert de guide de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d’une explication *en italique*. Là où la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Andriessse, W., Giller, K.E., Jiggins, J., Löffler, H., Oosterveer, P. and Woodhill, J. (2007) The Role of Agriculture in Achieving MDG1 – a Review of the Leading Reports. 90 Wageningen International, Wageningen. Téléchargé en août 2012 de <http://library.wur.nl/way/bestanden/clc/1860193.pdf>.

Ce document donne un aperçu d'une série de rapports importants concernant l'agriculture et le premier Objectif du millénaire pour le développement réduire de moitié la pauvreté et la faim d'ici 2015. Disponible en ligne.

de Koeijer, T.J., Wossink, G.A.A., van Ittersum, M.K., Struik, P.C. and Renkema, J.A. (1999) A conceptual model for analysing input–output coefficients in arable farming systems: from diagnosis towards design. *Agricultural Systems* 61, 33–44.

Un article de recherche qui aborde la différence entre le processus de prise de décisions opérationnelles, tactiques et stratégiques au niveau d'une exploitation agricole.

Dorward, A. (2009) Integrating contested aspirations, processes and policy: development as hanging in, stepping up and stepping out. *Development Policy Review* 27, 131–146.

Dans cet article, vous trouverez une description intéressante de stratégies de subsistance largement différentes appliquées par les petits producteurs.

Giller, K.E., Tittonell, P., Rufino, M.C., van Wijk, M.T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., Rowe, E.C., Baijukya, F., Mwijage, A., Smith, J., Yeboah, E., van der Burg, W.J., Sanogo, O.M., Misiko, M., de Ridder, N., Karanja, S., Kaizzi, C., K'ungu, J., Mwale, M., Nwaga, D., Pacini, C. and Vanlauwe, B. (2011) Communicating complexity: integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural Systems* 104, 191–203.

Cet article traite de la diversité des systèmes d'exploitation agricole des petits exploitants en Afrique et aborde l'application de l'analyse des systèmes d'exploitation agricoles focalisés sur les technologies GIFS

Sanginga, N. and Woome, P. (eds) (2009) *Integrated Soil Fertility Management in Africa: Principles, Practices and Developmental Process*. Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture, Nairobi, 263 pp.

Un livre sur la gestion intégrée de la fertilité des sols en Afrique.

Tittonell, P., Vanlauwe, B., Misiko, M. and Giller, K.E. (2011) Targeting resources within diverse, heterogeneous and dynamic farming systems: towards a 'uniquely African Green Revolution'. In: Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J.M., Maina, F. and Kihara, J. (eds) *Innovations as Key to the Green Revolution in Africa: Exploring the Scientific Facts*. Springer, Dordrecht, pp. 747–758.

Cette communication à une conférence discute de l'adaptation des technologies GIFS en vue de la mise en œuvre de la vision de Kofi Annan sur la révolution verte qui reconnaît la diversité de l'agriculture en Afrique.

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K., Smaling, E.M.A. and Woome, P.L. (2010) Integrated soil fertility management: operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture* 39, 17–24.

Dans cet article, la GIFS est définie et expliquée en détails.



Photo 2.1 Les paysages agricoles en Afrique sub-saharienne sont très diversifiés et les agents doivent identifier les techniques GIFS les mieux adaptées à la zone spécifique dans laquelle ils travaillent. Des agriculteurs cultivent les cultures vivrières et des bananeraies sur une pente à l'Est de la République Démocratique du Congo (RDC) où une conservation du sol appropriée est requise (1). Le riz de bas-fonds est une culture de base et peut présenter des opportunités pour l'intensification de culture orientée vers le marché à l'Ouest du Rwanda (2). Un grand marais plat et drainé au fond d'une vallée offre des opportunités de production des cultures de subsistance à l'Ouest du Rwanda (3). Des terres escarpées avec des cultures de subsistance à l'Ouest du Rwanda où l'érosion appauvrit le sol en ses ressources et où les cultures pérennes seraient plus durables (4).



Photo 2.2 De larges zones de terre dégradée en Afrique sub-saharienne pourraient être en production. La réhabilitation des sols exige beaucoup de matières organiques ainsi que des engrais minéraux pour restaurer la productivité.



Photo 2.3 La fertilité des sols varie beaucoup au sein des champs de cette exploitation. Diverses stratégies de gestion de la fertilité du sol seront nécessaires pour chaque champ et l'agriculteur doit gérer tous les champs dans le cadre d'une stratégie globale.

3 Les principes de la GIFS



3.1 Introduction

Dans cette section nous abordons l'histoire du développement de la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) et comment cette approche a été élaborée en s'appuyant sur une expérience de plus de 50 ans en matière de gestion de la fertilité des sols en Afrique sub-saharienne. Cette section fournit ensuite une définition de la GIFS qu'elle décompose en ses éléments constitutifs. Elle explique également la théorie et le raisonnement conceptuel de la GIFS.

Des informations de base sur l'agronomie des cultures et la science du sol sont fournies dans la Section 6 au profit des agents qui ne disposent pas de connaissances techniques approfondies nécessaires dans la vulgarisation des techniques GIFS.

3.2 Historique des approches de la gestion de la fertilité du sol en Afrique sub-saharienne

Au cours des trois dernières décennies, la conception qui sous-tend la gestion des nutriments dans les systèmes de culture en Afrique sub-saharienne a connu une mutation considérable à la faveur de connaissances améliorées, fondées sur des recherches approfondies sur le terrain, ainsi que sur des mutations dans l'environnement général social, économique et politique de l'Afrique sub-saharienne (Tableau 3.1).

Dans les années 1960 et 1970, une attention particulière a été portée sur l'utilisation des engrais minéraux pour une nutrition adéquate des cultures et une amélioration du rendement. (Tableau 3.1). Au cours des années 1980, l'accent a été plus fortement mis sur l'usage des ressources organiques, en partie à cause des problèmes d'accès aux engrais en Afrique sub-saharienne pendant cette période.

Aujourd'hui, beaucoup de recherches ont démontré l'importance de combiner l'utilisation des engrais minéraux et des matières organiques de manière à les adapter aux conditions locales pour obtenir des rendements satisfaisants et une utilisation efficiente des engrais. Cela constitue l'essence même de la GIFS.

Tableau 3.1 Changements des paradigmes de gestion de la fertilité des sols tropicaux au cours des cinq dernières décennies.

Période	Approche	Rôle de l'engrais	Rôle des intrants organiques	Expérience
Années 1960 et 1970	Utilisation d'intrants externes.	Utilisation des engrais seuls considérée suffisante pour améliorer et maintenir les rendements.	Les ressources organiques jouent un rôle minimal.	Succès limité en raison des lacunes au niveau des infrastructures, des politiques et des systèmes de culture.
Années 1980	Utilisation des intrants organiques.	L'engrais joue un rôle minimal.	Les ressources organiques sont la principale source de nutriments.	Adoption limitée. La production de la matière organique exige du bétail, de grandes étendues de terres et de la main-d'œuvre.
Années 1990	Utilisation combinée d'engrais et de résidus organiques.	Utilisation d'engrais essentielle pour alléger les contraintes principales liées aux nutriments.	Les ressources organiques sont le principal "point d'entrée" pour l'amélioration de la fertilité des sols et jouent d'autres rôles outre l'apport de nutriments.	Adoption localisée pour des cultures spécifiques.
Années 2000	Gestion intégrée de la fertilité des sols.	Les engrais sont le principal point d'entrée pour accroître les rendements et apporter les ressources organiques nécessaires.	Les ressources organiques peuvent améliorer l'efficacité de l'usage des engrais.	Objectif d'une adoption à grande échelle!



3.2.1 Utilisation des engrais minéraux

Depuis l'invention des engrais minéraux au 19^{ème} siècle jusqu'aux années 1980, l'utilisation des engrais couplée avec celle des semences et plants améliorés a été le principal facteur d'amélioration de la productivité agricole. L'utilisation adéquate des intrants externes (c'est-à-dire engrais, chaux et eau d'irrigation) a pu assurer une production durable des cultures, et l'utilisation accrue des engrais minéraux a été responsable en grande partie de l'amélioration de la productivité agricole au niveau mondial.

L'utilisation des intrants externes, principalement les engrais et la chaux, combinée avec l'usage des variétés de céréales améliorées, l'irrigation et l'augmentation du nombre de cultures plantées chaque année, une combinaison qu'on appelle intensification des cultures, a donné lieu à une "révolution verte" en Asie et en Amérique latine où on a assisté à une considérable augmentation des rendements des cultures au cours des années 1960.

La recherche et l'expérience, notamment en ce qui concerne le maïs, le riz, les légumineuses et le coton ont montré que les engrais ont le potentiel d'être un outil puissant d'amélioration de la productivité en Afrique sub-saharienne. Dans le passé, certains agriculteurs étaient frustrés par l'utilisation des engrais, parce que les recommandations d'engrais n'étaient pas suffisamment adaptées aux conditions spécifiques des paysans:

- Nous savons que dans les zones densément peuplées avec un accès limité aux ressources organiques, la fertilité du sol varie largement au sein d'une même exploitation. Par exemple, il peut y avoir des champs plus fertiles tout près de la maison de l'agriculteur et des sols moins fertiles dans des champs plus éloignés.
- Les conditions socio-économiques de l'agriculteur doivent être prises en compte lors de l'élaboration des recommandations d'engrais. Par exemple, les agriculteurs tournés vers le marché sont fermement engagés dans la production des cultures destinées à la vente, tandis que les autres, généralement moins bien dotés en ressources de production (terre, main-d'œuvre, argent), sont moins tournés vers le marché et cherchent plutôt à assurer leur autosuffisance alimentaire.

Ne pas répondre directement aux objectifs des agriculteurs et ne pas prendre en compte leur environnement opérationnel a souvent entraîné des résultats décevants par rapport à l'utilisation des engrais au cours des années 1980 et 1990.

Les agriculteurs considéraient les engrais comme étant "trop coûteux" ou "inabordables", surtout lorsque leurs prix ont augmenté à la suite de la suppression des subventions. Jusqu'à présent, les engrais coûtent plus chers dans la majorité des pays d'Afrique sub-saharienne que nulle part ailleurs, essentiellement en raison du manque d'infrastructures efficaces pour le marché des engrais et des mauvais réseaux de transport.

Dans une certaine mesure, l'utilisation des engrais en Afrique sub-saharienne a été influencée par les préoccupations exprimées en Europe, en Amérique du Nord et dans certaines parties d'Asie où l'utilisation excessive d'engrais minéraux a parfois provoqué des impacts environnementaux indésirables. Certains décideurs

Encadré 3.1 La Déclaration d'Abuja

La **Déclaration d'Abuja** a été adoptée par le Sommet de l'UA sur les engrais en Afrique qui s'est tenu à Abuja, au Nigeria, en juin 2006. La Déclaration fixe les objectifs suivants:

- Accroître le niveau d'utilisation d'engrais de la moyenne annuelle actuelle de 8 kilogrammes d'éléments nutritifs par hectare à au moins 50 kilogrammes par hectare d'ici 2015.
- Réduire les coûts d'achat des engrais aux niveaux régional et national.
- Améliorer l'accès des agriculteurs aux engrais en développant et en multipliant les réseaux de distributeurs d'intrants et ceux des communautés locales dans les régions rurales.
- Prendre des mesures concrètes tenant compte des besoins des agriculteurs, en particulier des femmes mais également développer et renforcer les capacités des jeunes, des associations paysannes, des organisations de la société civile et du secteur privé.
- Améliorer l'accès des agriculteurs aux engrais en accordant des subventions au secteur des engrais, particulièrement aux agriculteurs pauvres.

politiques craignent que l'usage accru d'engrais ne provoque des problèmes similaires en Afrique sub-saharienne. Pour le moment, néanmoins, les taux d'application d'engrais en Afrique sub-saharienne sont très faibles (5 à 10 kg/ha), bien en-dessous de l'objectif minimum de 50 kg/ha fixé par la Déclaration d'Abuja (Encadré 3.1) et jusqu'à dix fois inférieur par rapport aux taux d'application enregistrés dans les régions plus économiquement développées que l'Afrique sub-saharienne.

Les résultats des essais agronomiques sur le long terme effectués dans différents pays montrent que le sol peut être appauvri en certains nutriments lorsque l'utilisation d'engrais est déséquilibrée, par exemple quand des quantités importantes d'engrais azotés sont appliquées sans les quantités requises d'engrais contenant les P, K et autres nutriments. Néanmoins, ces problèmes peuvent être corrigés ou prévenus par la GIFS.

Durant les années 1990, les résultats de la recherche et de l'expérience ont montré que les inquiétudes écologiques et agronomiques concernant les engrais peuvent être dissipées grâce à leur utilisation judicieuse en combinaison avec des intrants organiques (paille, compost, jachères de légumineuses), et des amendements du sol localement disponibles, tels que le phosphate naturel et la chaux réactifs. D'autres initiatives ont suivi pour identifier des approches aptes à générer les intrants organiques nécessaires, en se servant des technologies basées sur l'agroforesterie et l'utilisation des légumineuses herbacées (par exemple les cultures de couverture) ou des légumineuses à grains à double usage (par exemple le soja de longue durée).

Dans certaines régions, la plus grande inquiétude concernant l'utilisation des engrais est probablement ses faibles performances dans des environnements hostiles où la couche supérieure du sol a été lessivée par l'érosion et le ruissellement, et où les stocks d'éléments nutritifs, outre ceux apportés par les engrais, ont diminué faute de restitution des nutriments, réduisant ainsi la réponse des sols aux engrais. De plus, d'autres facteurs tels que la sécheresse, les mauvaises herbes, l'acidité et l'alcalinité des sols, rendent souvent l'utilisation d'engrais peu économique à cause des faibles absorptions des nutriments et leur assimilation pour se transformer en produits végétaux.

Voilà certains des facteurs qui ont amené les chercheurs à adopter l'utilisation *combinée* d'engrais et de matières organiques (résidus de cultures et fumier animal) pour améliorer la productivité des cultures et l'efficacité agronomique.

3.2.2 Recours aux méthodes à faible apport d'intrants pour améliorer la fertilité des sols

L'agriculture durable à faible utilisation d'intrants externes (LEISA) et ce qu'on appelle les méthodes à "faible apport d'intrants" ont été promues par certains donateurs et ONG pour répondre à certains des problèmes évoqués ci-dessus et au coût élevé des engrais. L'approche LEISA part du principe que les ressources organiques sont disponibles en quantité suffisante pour améliorer la productivité et préserver le socle des ressources naturelles.

Les légumineuses, les arbres et arbustes apportent des quantités importantes de N par la fixation biologique de l'azote, et les arbres à racines profondes recyclent à la surface du sol des nutriments absorbés dans les couches en-dessous des racines des cultures annuelles. Néanmoins, dans la plupart des cas, l'utilisation d'intrants organiques, tels que le fumier et le compost, fait partie des flux internes de nutriments dans l'exploitation et, par conséquent, ne donne pas lieu à un apport additionnel quelconque de nutriments aux champs.

La conservation de nutriments est évidemment importante, mais si le capital de nutriments au sein d'un système d'exploitation agricole est insuffisant, les rendements stagnent et les agriculteurs sont piégés par une spirale descendante de diminution des stocks de nutriments et de baisse des rendements. (Figure 3.1). En réaction, l'agriculteur est obligé d'élargir la zone mise en culture pour atteindre ses objectifs de production.

En même temps, les essais agronomiques montrent qu'on enregistre souvent d'importantes augmentations de rendements de cultures lorsqu'on apporte des nutriments au système de culture. Il a été également constaté que la qualité des ressources organiques est souvent mauvaise et la quantité du fumier ou d'autres matières organiques est tout simplement insuffisante pour répondre à la demande des cultures en éléments nutritifs. La teneur des matières organiques en nutriments est généralement plus faible que celle des engrais minéraux et, par conséquent, leur stockage, transport et application coûtent plus chers.

Par exemple, les systèmes d'élevage en Afrique de l'Ouest, ont actuellement des taux d'application moyens très faibles (0,5–2 t/ha) et le transfert potentiel de nutriments du fumier animal aux champs de cultures est donc seulement d'environ 2,5 kg de N et 0,6 kg de P/ha de terres cultivées, insuffisant pour pourvoir aux besoins des cultures.

En dépit de son rôle crucial dans la préservation de la fertilité des sols, la quantité de fumier nécessaire n'est simplement pas disponible parce qu'il n'y a pas assez d'animaux pour le produire, notamment lorsque la sécheresse cause la diminution du bétail en raison de la pénurie de fourrage. Les paysans ne peuvent augmenter le nombre de leurs têtes de bétail que s'ils ont suffisamment de pâturage ou s'ils sont capables de fournir assez de fourrage, qui à son tour exige une productivité de cultures accrue pour produire des quantités suffisantes de résidus de cultures et de fourrage pour animaux.

De même, bien que la préparation du compost à partir de la paille soit préconisée, l'analyse des systèmes d'exploitation agricole révèle clairement qu'il y a plusieurs usages en concurrence pour la paille. Par exemple, là où la paille est utilisée comme aliment pour bétail, il n'y en a pas assez qui puisse être épargnée pour la préparation du compost.

Il est possible de produire des intrants organiques en plantant des cultures de couverture (par exemple *Mucuna pruriens*) et d'autres plantes, que ce soit près de la maison du paysan ou loin de la maison, devant être utilisées comme amendements du sol. Même si des résultats prometteurs ont été obtenus dans des essais agronomiques contrôlés par des chercheurs, les agriculteurs adoptent rarement ces pratiques, parce qu'elles: (i) exigent une haute intensité de main-d'œuvre; (ii) ne peuvent pas fournir suffisamment de nutriments pour soutenir la productivité; et (iii) ne produisent pas des produits qui peuvent être consommés ou vendus au marché. La culture des plantes de couverture sur des sols pauvres est, en réalité, un simple recyclage de la pauvreté.

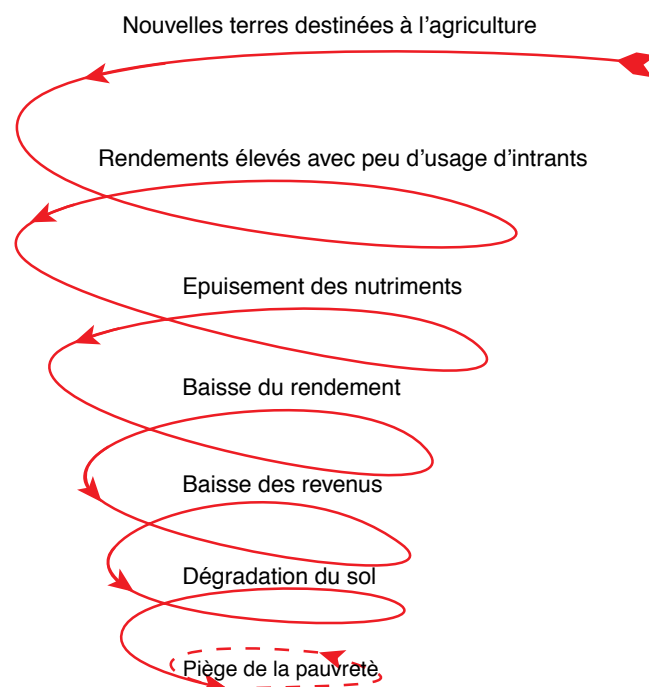


Figure 3.1 Spirale de pauvreté descendante pour les systèmes d'exploitation agricole où les nutriments ajoutés ne suffisent pas à maintenir la fertilité du sol.

Ce sont là quelques-unes de raisons pour lesquelles la préservation de la fertilité des sols et l'accroissement de la productivité en n'utilisant que des ressources organiques se sont avérées peu pratiques. Toutes les preuves scientifiques indiquent que sur les sols appauvris d'Afrique sub-saharienne, on ne peut pas accroître la production sans apporter aux champs des nutriments externes soit par le biais de fumier animal ou d'engrais minéraux.

3.2.3 Vers l'intégration de l'utilisation de l'engrais et de la matière organique

La stratégie GIFS se sert des mêmes principes de base, mais elle a évolué de la recherche de matière organique vers l'utilisation d'engrais, pour générer les ressources organiques nécessaires sous forme de résidus de cultures ou de fumier issus des cultures produites (Tableau 3.1). La recherche agronomique au cours des vingt dernières années démontre la nécessité de combiner les ressources organiques et les engrais minéraux pour accroître la fertilité des sols, améliorer les rendements des cultures et les moyens de subsistance des paysans. Ce sont là certains des arguments à la base de la Déclaration d'Abuja de 2006 (Encadré 3.1).

3.3 Définition de la GIFS

La Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols peut être définie comme étant:

Un ensemble de pratiques de gestion de la fertilité du sol qui impérativement passent par l'utilisation des engrais, des intrants organiques et de germoplasme amélioré, combinée avec les connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux conditions locales, pour l'optimisation de l'efficacité agronomique des nutriments appliqués et l'accroissement du rendement des cultures. La gestion de tous les intrants doit se fonder sur des principes agronomiques et économiques rationnels.

Le processus est décrit en termes d'interventions, d'extrants, de résultats et d'impact dans la Figure 3.2.

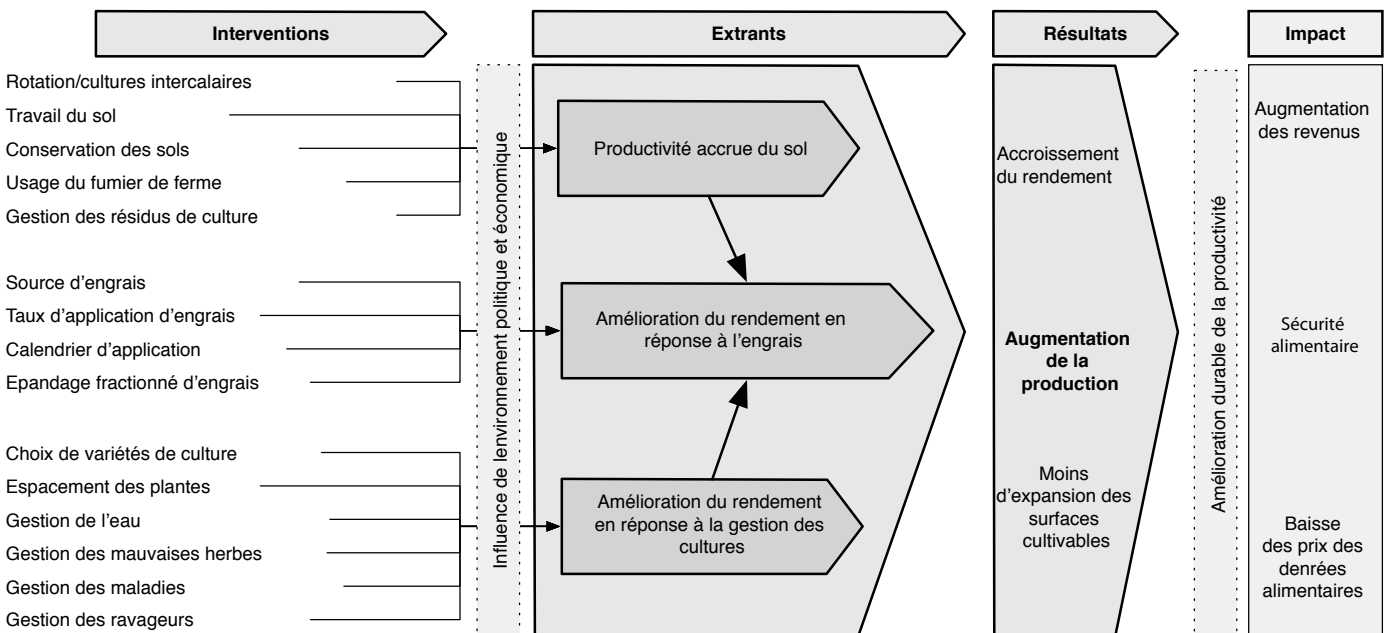


Figure 3.2 La GIFS consiste en l'usage combiné d'interventions appropriées en gestion des sols, utilisation d'engrais et gestion des cultures en vue de stimuler les principaux extrants que sont un rendement et une productivité améliorés. L'introduction des interventions est tributaire des forces du marché et des politiques gouvernementales. Quand cette introduction est réussie, la productivité s'améliore et on a besoin de moins de terres pour atteindre un niveau donné de production. Le résultat est une amélioration durable de la sécurité alimentaire, avec plus de revenus pour les paysans et une réduction des prix des denrées alimentaires, au profit de la population urbaine.

Cette définition rassemble toutes les composantes agronomiques nécessaires pour la bonne croissance des cultures et un bon rendement, y compris l'utilisation de plants à haut rendement et sains, de nutriments apportés comme matières organiques ou engrais minéraux, et d'autres amendements du sol.

L'approche GIFS embrasse les principes de l'écologie de la production végétale où le rendement est une fonction de l'interaction entre le génotype, l'environnement et la gestion:

$$\text{Rendement} = G (\text{génotype}) \times E (\text{environnement}) \times G (\text{gestion})$$

où:

- Le **G**énotype représente les semences ou les plants utilisés dans le système de culture. Ils peuvent être des variétés locales ou améliorées.
- L'**E**nvironnement se rapporte aux sols et au climat dans une zone donnée.
- La **G**estion se rapporte aux capacités et aptitudes de l'agriculteur à gérer les cultures et le système de culture.

Nous allons maintenant utiliser certains diagrammes ou modèles pour explorer l'effet de la GIFS sur l'efficacité de l'utilisation des engrais et le rendement.

Un modèle peut être utilisé pour illustrer l'impact de passer à une mise en œuvre plus complète de la GIFS (Figure 3.3):

- Plus la mise en œuvre de la GIFS est complète, plus la valeur de l'efficacité agronomique est grande.
- Nous faisons la distinction entre les sols sensibles et les sols moins sensibles:
 - La réponse aux semences et aux engrais est élevée sur les sols sensibles (point A).
 - La réponse aux semences et aux engrais est faible sur les sols moins sensibles "dégradés" (point B) et les ressources organiques sont nécessaires pour une utilisation efficace des engrais et des semences améliorées (point C).

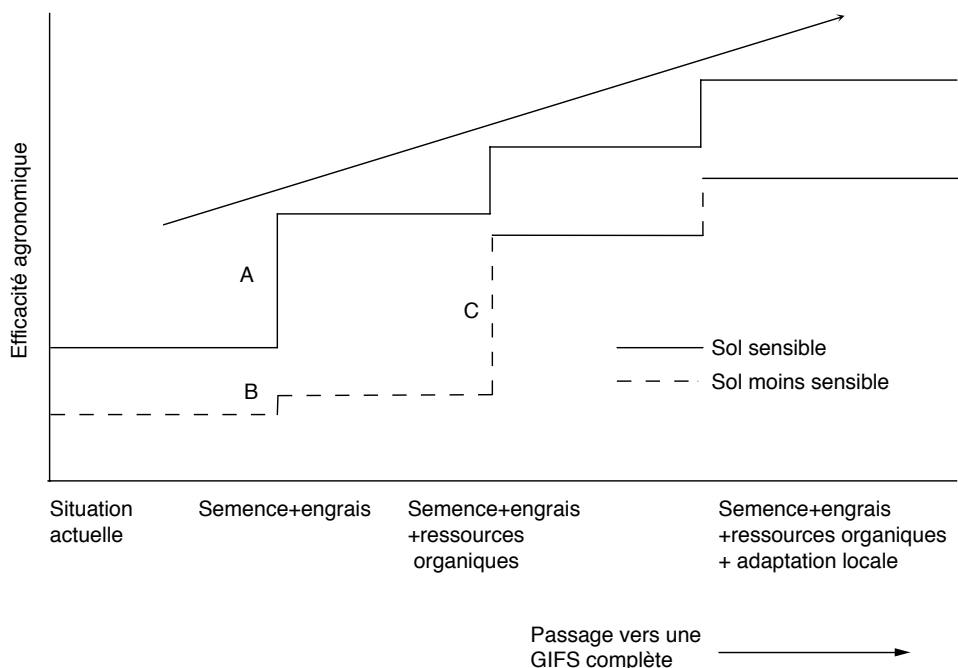


Figure 3.3 Lien entre l'efficacité agronomique des engrais et des ressources organiques et la mise en œuvre de diverses composantes de la GIFS.

La mise en œuvre complète de la GIFS exige des connaissances sur la façon d'adapter ces pratiques aux contraintes et opportunités de chaque exploitation. Nous allons maintenant expliquer la signification de chaque partie de la définition de la GIFS.

Un autre modèle peut être utilisé pour expliquer les interactions entre différentes composantes de la GIFS (Figure 3.4):

- La réponse à l'engrais est grande lorsque l'engrais est appliqué en y ajoutant des ressources organiques (par exemple le fumier animal) (ligne A) et la réponse est même plus grande à des taux plus élevés d'apport d'engrais (ligne B).
- L'impact du fumier animal sur la réponse aux engrais dépend de la quantité de fumier appliquée.
- Une bien plus grande quantité d'engrais est nécessaire pour atteindre le niveau de rendement de la ligne C lorsqu'aucune matière organique n'est utilisée (ligne A) en comparaison avec l'utilisation d'engrais minéraux combinés avec la matière organique (ligne B).

Lorsque deux composantes utilisées en combinaison donnent lieu à un rendement plus grand que les deux composantes utilisées séparément, nous appelons cette synergie une "interaction positive". La mesure dans laquelle les agriculteurs réalisent ces interactions positives dépendra des coûts relatifs des ressources organiques et des engrais. Un agriculteur ayant un accès facile au fumier optera probablement pour l'utilisation d'une combinaison du fumier et de l'engrais, tandis que celui qui n'a pas accès au fumier devra utiliser plus d'engrais. Cette décision est un exemple de ce que nous appelons une "adaptation locale" et illustre l'argument selon lequel l'analyse économique devrait déterminer les choix GIFS.

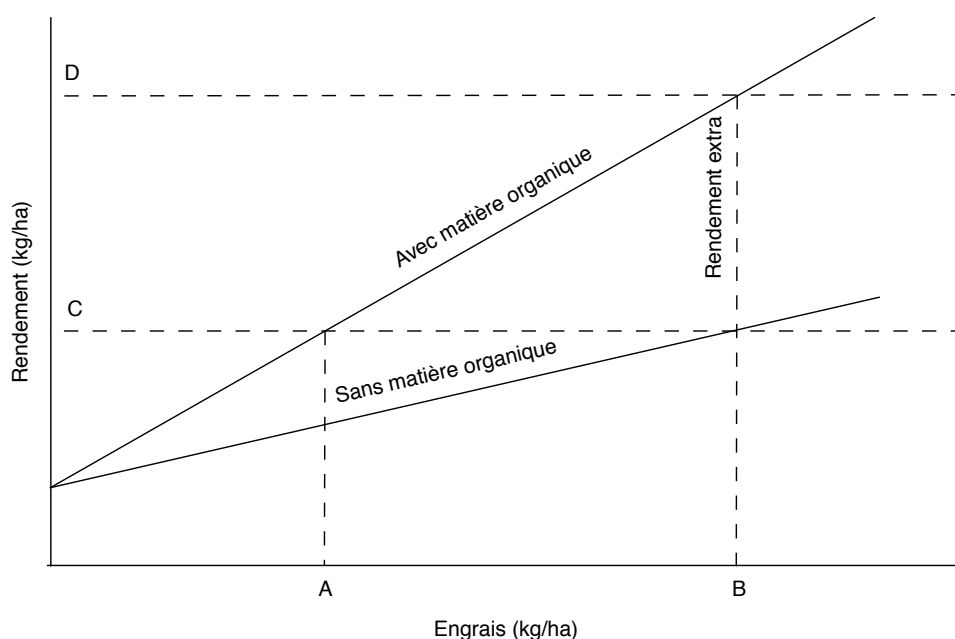


Figure 3.4 Interaction positive entre engrais et intrants organiques donnant des rendements supplémentaires grâce aux pratiques GIFS.

3.3.1 Utilisation d'engrais minéraux

Les engrais minéraux sont nécessaires comme suppléments aux nutriments recyclés ou ajoutés sous forme de résidus de cultures et de fumier animal. Les engrais sont des sources concentrées de nutriments essentiels qui sont sous une forme facilement assimilable par des plantes. Ils sont souvent moins coûteux que le fumier animal en termes de coûts des éléments nutritifs qu'ils contiennent (\$/kg de nutriment), mais ils sont souvent considérés plus coûteux par les agriculteurs parce qu'ils exigent un paiement au comptant.

La GIFS insiste sur l'utilisation d'engrais minéraux dans les champs où ils peuvent produire un meilleur effet au sein d'une même exploitation.

3.3.2 Utilisation d'intrants organiques

Les intrants organiques (résidus de cultures et fumier animal) constituent aussi une source importante de nutriments, mais leur teneur en N, P, Mg et Ca n'est libérée qu'après la décomposition. Par contre, K est libéré rapidement du fumier animal et des résidus de cultures parce qu'il est contenu dans la sève de la cellule. En outre, la quantité de nutriments contenus dans les ressources organiques est généralement insuffisante pour assurer les niveaux de productivité des cultures requis et réaliser le plein potentiel économique de la terre du paysan et des ressources en main-d'œuvre.

Outre l'apport d'éléments nutritifs, les intrants organiques contribuent également à la croissance des cultures par d'autres moyens en:

- augmentant la réponse des cultures aux engrais minéraux;
- améliorant la capacité du sol à conserver l'humidité;
- régulant les propriétés chimiques et physiques du sol qui affectent le stockage et la disponibilité des éléments nutritifs ainsi que le développement racinaire;
- apportant des nutriments qui ne sont pas contenus dans les engrais minéraux;
- créant un meilleur environnement racinaire;
- améliorant la disponibilité du phosphore pour son absorption par les plantes;
- atténuant des problèmes tels que l'acidité du sol; et
- réapprovisionnant le sol en matière organique.

Dans la gestion intégrée de la fertilité des sols, nous soulignons l'importance d'optimiser l'utilisation des ressources organiques après avoir exploré leur coût d'opportunité (par exemple en comparant la rétention des ressources organiques dans le champ avec leur utilisation comme aliment du bétail, paillage ou production de compost).

3.3.3 Utilisation de germoplasme amélioré

Il est important que l'agriculteur utilise le matériel végétal (généralement des semences mais parfois aussi des plantules) le mieux adapté à une exploitation donnée en termes de:

- Capacité de réponse aux nutriments (les variétés diffèrent en ce qui concerne leur capacité de réponse aux nutriments apportés);
- Adaptation à l'environnement local (sols, climat); et
- Résistance aux ravageurs et aux maladies (les plants malades n'absorbent pas bien les nutriments).

Le germoplasme amélioré a généralement un indice de récolte élevé (le ratio du produit récolté / production totale de biomasse) parce qu'une plus grande partie de la production totale de biomasse est convertie en produit récolté par rapport aux variétés non améliorées. Cependant, les variétés de légumineuses améliorées avec un faible indice de récolte sont souvent sélectionnées parce qu'elles peuvent être utilisées comme plantes à "double fonction". Par exemple, les variétés de soja à fonctions multiples utilisées comme denrées alimentaires, aliment pour bétail et pour

l'amélioration de la fertilité des sols fournissent beaucoup de biomasse qui profite à la culture suivante dans la rotation, en plus d'un rendement en grains acceptable.

Les agriculteurs devraient être informés des nouvelles variétés prometteuses qui ont été testées et approuvées pour une utilisation dans leur localité.

3.3.4 Résultat de la combinaison de l'utilisation d'engrais, d'intrants organiques et de germoplasme

Nous allons maintenant nous servir de trois exemples pour illustrer l'importance d'examiner les interactions entre l'utilisation d'engrais, d'intrant organique et de germoplasme.

L'accroissement du rendement est généralement élevé lorsque les intrants organiques et les engrais sont utilisés ensemble. Par exemple, à Sadore, au Niger, le rendement du mil a progressé d'environ 1t/ha en ajoutant uniquement des résidus de cultures et de 1,5 t/ha en ajoutant uniquement des engrais (Figure 3.5). Quand les engrais et les résidus de cultures ont été appliqués ensemble, l'accroissement du rendement a été plus important et il a augmenté progressivement sur le long terme.

L'effet de la nutrition des cultures et du germoplasme amélioré est illustré par l'effet des engrais sur le rendement des variétés de maïs à pollinisation libre locales ou améliorées du Sud Kivu, en RDC (Figure 3.6). Dans cet exemple, les rendements de deux variétés locales (Kasai et Kuleni) et ceux de deux variétés améliorées (BH140 et BH540) de maïs à pollinisation libre ont été comparés, lorsqu'elles sont cultivées avec ou sans engrais. Les traitements avec engrais ont reçu 60 kg de N, 13 kg de P et 25 kg de K/ha appliqués comme engrais composé NPK (17-17-17) et de l'urée (46% N) en deux applications : fumure de fond et fumure d'entretien.

Nous pouvons tirer quelques enseignements importants de cet essai:

- Le plus grand rendement a été obtenu avec des hybrides fertilisés.
- Les deux variétés locales ont produit des rendements élevés avec l'utilisation d'engrais plus que la variété BH140 sans engrais. Donc l'application d'engrais aux variétés locales peut améliorer les rendements de façon significative.
- Les variétés locales et améliorées ont produit de plus grands rendements en grains lorsque l'engrais a été appliqué et l'accroissement du rendement a été semblable pour les variétés locales et le BH540. La meilleure réponse aux engrais a été observée sur la variété BH140. Le BH540 n'a pas mieux répondu aux engrais que les deux variétés locales.
- Les rendements ont plus que doublé passant de 2,6 t/ha (variété Kasai sans engrais) à 6 t/ha (variété BH540 avec engrais) lorsqu'on a utilisé les engrais et le germoplasme amélioré.
- Le rendement de la variété BH540 non fertilisée était légèrement supérieur à celui des deux variétés locales avec application d'engrais.

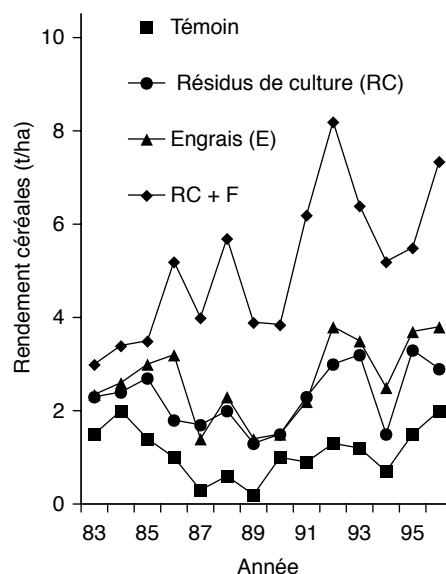


Figure 3.5 Effets à long terme de l'engrais et des résidus de cultures sur la récolte céréalière de mil à Sadore, au Niger.

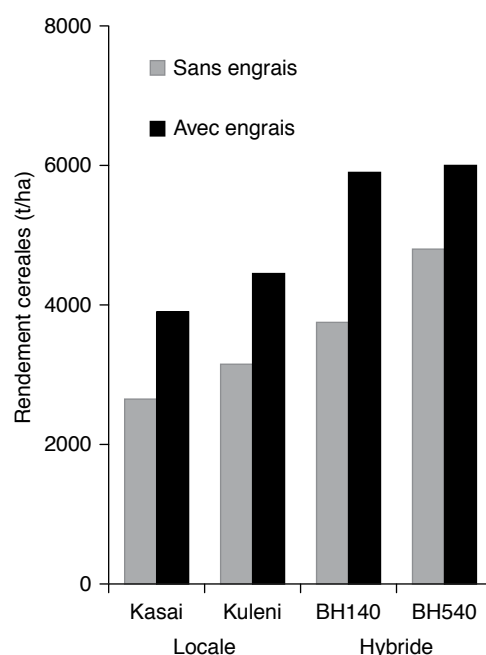


Figure 3.6 Effets des engrais sur les rendements de deux variétés locales et deux variétés améliorées de maïs au Sud Kivu, en RDC.

- L'analyse économique sera nécessaire pour identifier la combinaison la plus rentable de matériel végétal et d'application d'engrais.

Ces mêmes variétés pourraient répondre différemment à ces traitements dans une localité différente. Il est donc recommandé d'éviter des généralisations basées sur les résultats d'une seule expérience. Par exemple, contrairement aux résultats de cette expérience, les variétés améliorées répondent souvent mieux aux engrais que les variétés locales.

Il est important de considérer la réponse aux engrais minéraux lorsqu'on sélectionne les variétés pour une zone donnée (Figure 3.7). Dans cet exemple, le rendement en grains de différentes variétés de soja a été comparé avec et sans apport de l'engrais P. Certaines variétés avaient de faibles rendements (par exemple Point a), tandis que d'autres avaient un bon rendement mais ne répondaient pas à l'engrais P (par exemple, point b). Un groupe de variétés ont donné un bon rendement et bien répondu à la fertilisation par P et ont été sélectionnées pour des expériences suivantes en milieu paysan. (Point c).

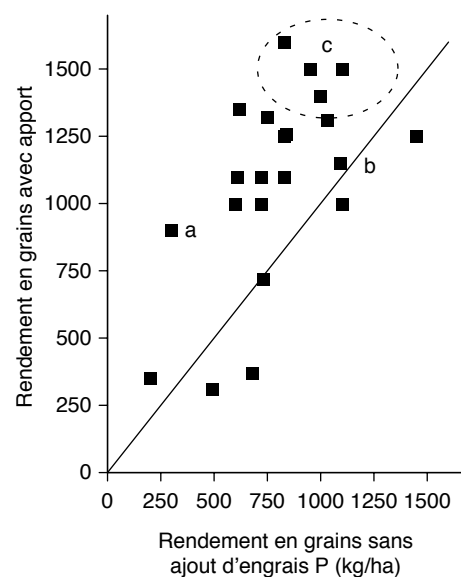


Figure 3.7 Réponse de différentes variétés de soja à l'engrais phosphaté.

Enfin, nous devons considérer l'effet de la gestion d'une exploitation agricole sur la réponse aux intrants (Figure 3.8). Dans cet exemple, il y avait un impact important sur le rendement des cultures et leur réponse aux engrais lorsqu'on améliore certains aspects de la gestion des cultures, tels que la date de semis et la densité, ainsi que la date de l'application de l'engrais P. Meilleure est la gestion des cultures, meilleure est la réponse aux engrais (Figure 3.8).

3.3.5 Importance de l'adaptation locale

La définition de la GIFS souligne l'importance de "l'adaptation locale" car nous devons prendre en compte la **variabilité**:

- entre exploitations, en termes d'objectifs agricoles, et de taille, de disponibilité en main-d'œuvre, de possession de bétail, de l'importance des revenus non agricoles; et
- en quantité de ressources de production (terre, argent, main-d'œuvre, résidus de cultures et fumier animal) que les différentes familles paysannes sont en mesure d'investir dans leurs champs.

La définition de la GIFS met l'accent sur l'importance d'utiliser les ressources qui sont souvent rares, telles que les engrais et les intrants organiques, de façon efficace dans la réalisation des objectifs économiques fixés pour chaque ménage paysan.

Nous distinguons souvent trois types de sols dans les champs des paysans (Figure 3.9):

- les champs fertiles peu sensibles aux intrants externes (champ de case) se trouvent souvent à proximité de la maison du paysan et ont bénéficié pendant plusieurs années d'apports d'intrants, tels que les déchets ménagers, les résidus de cultures, le fumier animal et parfois les déchets humains.
- Les champs sensibles aux intrants externes se trouvent souvent à une certaine distance de la maison familiale où les résidus de de récolte et le fumier animal n'ont pas été utilisés.
- Les champs de brousse sensibles aux intrants externes se trouvent également à une plus grande distance de la maison familiale et se sont dégradés, probablement parce qu'ils sont utilisés collectivement par la communauté et que les paysans sont réticents à y investir dans l'amélioration de la fertilité du sol, car ils ne sont pas certains qu'ils pourront continuer à les cultiver.

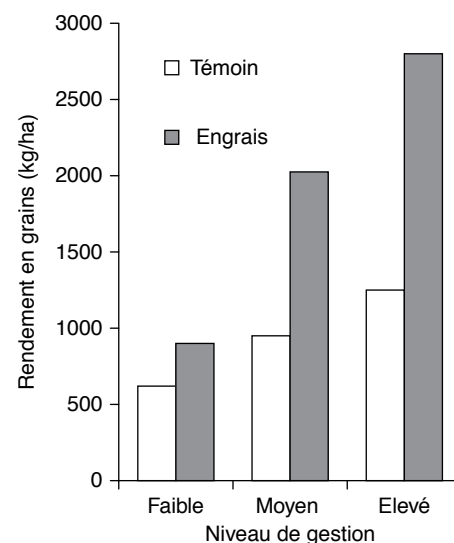


Figure 3.8 Effets de la gestion agronomique sur la réponse aux engrais.

Ainsi, l'adaptation locale implique aussi la nécessité de prendre en compte la capacité de réponse des sols :

- Seules de petites quantités d'engrais sont nécessaires pour reconstituer les stocks de nutriments et maintenir la fertilité des champs fertiles.
- Pour les sols sensibles aux intrants, les recommandations d'engrais devraient être adaptées à chaque champ en fonction des réponses attendues ou avérées. Ces recommandations devraient également comprendre des amendements du sol et d'autres pratiques de gestion de la fertilité des sols (par exemple intrants organiques) nécessaires pour obtenir une meilleure réponse.
- Les sols peu sensibles font souvent face à un ensemble de contraintes de production de cultures complexes et peu comprises. La réhabilitation ne devrait être effectuée que là où des solutions ont été développées et testées, et qui se sont avérées pratiques et économiques.

La réponse aux engrais et l'apport de grandes quantités de fumier animal ont été mesurés au Zimbabwe dans des champs sensibles proches de la maison et dans des champs non-sensibles éloignés (Figure 3.10). La réponse aux engrais dans des champs de case ne s'est pas améliorée avec l'apport de résidus de récolte, mais il y a eu une amélioration nette de la réponse aux engrais après 3 ans durant lesquels une grande quantité de résidus de récolte a été apportée au sol.

Un autre élément mis en exergue dans la GIFS est l'importance d'identifier des "points d'entrée" par où des composantes GIFS peuvent être introduites pour donner à l'agriculteur de grands bénéfices en termes d'utilisation d'intrants ou de changement de pratiques de production. Une analyse des systèmes d'exploitation agricole est effectuée pour identifier et prioriser les points d'entrée :

- Quelles parties du système d'exploitation agricole devraient être améliorées prioritairement ?
- Quel sera l'impact des améliorations des parties prioritaires du système d'exploitation agricole sur les autres composantes du système ?

3.3.6 Optimiser l'efficacité agronomique

L'expression selon laquelle « on ne peut gérer que ce qu'on peut mesurer » est valable dans le contexte de la GIFS. Nous nous servons du terme « efficacité agronomique » (EA) pour mesurer la quantité supplémentaire de produit obtenue par kilogramme de nutriments utilisés.

L'efficacité agronomique se définit comme étant le rendement supplémentaire obtenu grâce aux intrants appliqués, ou

$$EA-X \text{ (kg céréales/kg nutriments X)} = \frac{(Y_F - Y_C)}{X_{\text{appl}}}$$

où :

- Y_F et Y_C désignent les rendements (en kg/ha) du traitement où les nutriments ont été appliqués (Y_F) et celui de la parcelle témoin (Y_C) respectivement ; et
- X_{appl} est la quantité de nutriments X utilisés (kg de nutriments/ha) à partir d'engrais et d'intrants organiques.

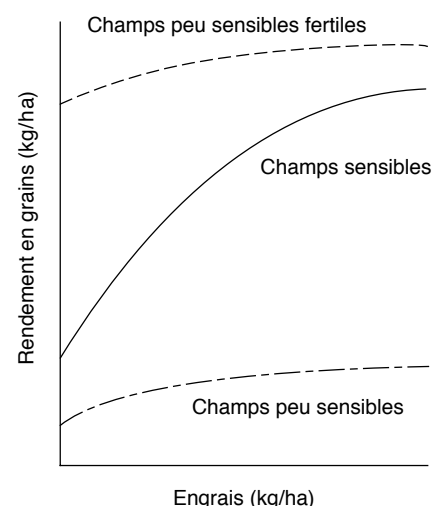


Figure 3.9 Réponses aux engrais dans des sols fertiles peu sensibles, dans des sols peu sensibles infertiles et dans des champs sensibles.

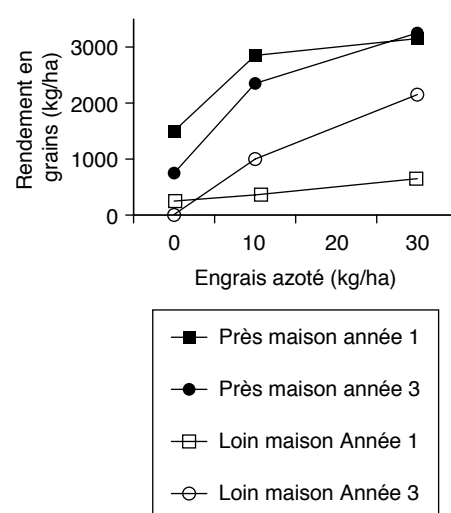


Figure 3.10 Réponse à l'engrais azoté et au fumier de ferme au fil du temps sur des champs réactifs proches de la maison du paysan et sur des champs éloignés initialement non-réactifs au Zimbabwe.

En d'autres termes l'efficacité agronomique de nutriments appliqués est égale au rendement supplémentaire des cultures obtenu grâce à l'utilisation de nutriments (c'est-à-dire le rendement obtenu suite au traitement avec des engrais moins le rendement obtenu sans traitement avec engrais) divisé par la quantité de nutriments appliqués (en kilogrammes par hectare).

La définition de la GIFS met l'accent sur la maximisation de l'efficacité agronomique des nutriments provenant des engrais et des intrants.

La définition de la GIFS se focalise sur la maximisation de l'efficacité agronomique des nutriments provenant des engrais et des intrants organiques étant donné que les deux sont des ressources rares dans les zones où l'intensification agricole est nécessaire.

Il est important de garder deux points à l'esprit:

Premièrement, pour une certaine valeur d'apport en nutriments (F_{appl}) il existe une relation linéaire entre l'efficacité agronomique et le rendement (Tableau 3.11). Autrement dit, pour un ratio donné d'utilisation de nutriments, une valeur plus élevée de l'efficacité agronomique donne des rendements plus élevés. Par exemple:

- Si Y_F est égal à 3000 kg/ha, Y_C à 2000 kg/ha (gain de rendement: 1000 kg/ha), et la quantité de nutriments appliqués (F_{appl}) est de 50 kg/ha, l'efficacité agronomique est de 20 kg de céréales/kg de nutriments (point a, Tableau 3.11).
- Si Y_F est égal à 5000 kg/ha, Y_C à 2000 kg/ha (gain de rendement: 3000 kg/ha), et la quantité de nutriments appliqués est de 50 kg/ha, l'efficacité agronomique est de 60 kg de céréales/kg de nutriments (point b, Tableau 3.11).
- Si Y_F est égal à 7000 kg/ha, Y_C à 2000 kg/ha (gain de rendement: 5000 kg/ha), et la quantité de nutriments appliqués est de 50 kg/ha, l'efficacité agronomique est de 100 kg de céréales/kg de nutriments (point c, Tableau 3.11).

Il y a plusieurs façons d'améliorer l'efficacité agronomique, et par conséquent le rendement, à un taux donné d'application d'engrais:

- Utiliser les nutriments au bon moment (c'est-à-dire quand ils doivent maximiser la croissance végétative et le rendement).
- Utiliser les nutriments au bon endroit (c'est-à-dire où la plante peut accéder aux nutriments et où l'absorption de nutriments est maximisée).
- Utiliser les engrais en plusieurs applications différées afin de réduire la quantité de nutriments perdus à cause du lessivage des sols.
- Semer les cultures à la bonne densité afin qu'il y ait suffisamment de plantes pour assurer un rendement maximal, et pas trop pour éviter des problèmes liés à la compétition entre les plants.

Deuxièmement, nous utilisons le terme ratio valeur/coût (RVC) pour évaluer la valeur économique de l'application d'engrais en comparant la valeur d'un rendement supplémentaire avec le coût des intrants requis pour réaliser l'accroissement du rendement:

$$RVC = \frac{\text{Céréales additionnelles produites (kg)} \times \text{valeur du produit (\$/kg)}}{\text{Intrants appliqués (kg)} \times \text{coût des intrants (\$/kg)}}$$

Une courbe de réponse typique aux engrais appliqués montre une réponse linéaire marquée aux doses les moins élevées d'application d'engrais (soit 0–50 kg/ha) (Tableau 3.12). Au fur et à mesure que le taux d'application d'engrais augmente de 50 à 250 kg N/ha, le niveau de réponse baisse jusqu'à atteindre un plateau, environ 6000 kg/ha dans le cas présent.

Si nous nous servons de la courbe de réponse pour calculer l'efficacité agronomique, nous constatons pour cet exemple qu'il y a une partie initiale où l'efficacité agronomique est d'une valeur constante et maximale d'environ

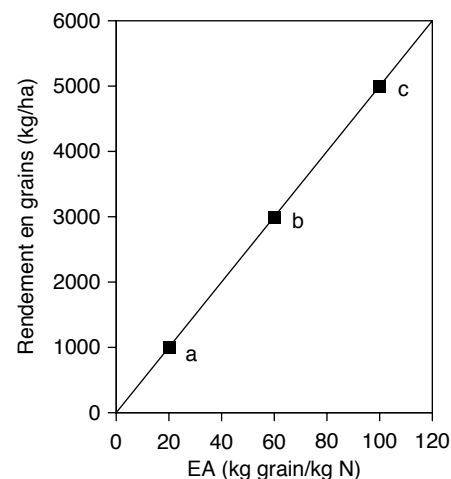


Figure 3.11 Lien entre l'efficacité agronomique de l'usage de l'azote et le rendement suite à l'usage d'un certain taux d'engrais (50 kg N/ha).

70 kg de céréales/kg de N (Tableau 3.12). A mesure que la courbe de réponse se rapproche du plateau, la valeur de l'efficacité agronomique diminue jusqu'à atteindre le point minimal de 20 kg de céréales/kg de N appliqué.

En d'autres termes, quand on utilise de grandes quantités d'éléments nutritifs, l'efficacité agronomique est réduite à des niveaux faibles. Dans l'agriculture à petite échelle d'Afrique subsaharienne, cependant, la plupart des fermiers appliquent des engrais au sein de la partie linéaire de la fonction de réponse (c'est-à-dire dans cet exemple <100 kg N/ha) et ainsi atteignent une efficacité agronomique assez élevée, aussi longtemps que des principes agronomiques sains sont mis en application dans le champ.

3.3.7 Principes agronomiques sains

L'approche GIFS suppose qu'une gestion appropriée des cultures est respectée afin de réaliser un retour maximal sur les investissements en germoplasme et nutriments utilisés. Une bonne gestion des cultures comprend l'utilisation de variétés appropriées, une préparation adéquate du sol, un bon espacement, de bonnes dates et pratiques de semis, de bonnes pratiques de gestion des mauvaises herbes, des ravageurs et des maladies, et enfin des associations de cultures appropriées.

Proportion équivalente de terre (LER)

Nous sommes souvent confrontés à la question de savoir s'il vaut mieux pour l'agriculteur de cultiver les plantes en association ou de les cultiver séparément. L'expression proportion équivalente de terre (LER) est utilisée pour évaluer la productivité des associations par rapport aux monocultures. La LER se définit comme la surface nécessaire pour chaque culture pour produire en monoculture le même rendement qu'un hectare de la même culture dans un système d'association.

LER est calculée comme suit:

$$LER = \sum \left(\frac{Y_i}{Ym_i} \right)$$

où:

- Y_i représente le rendement de chaque culture ou variété en association
- Ym_i représente le rendement de chaque culture ou variété en monoculture.

Un LER >1 signifie qu'une surface plus grande serait nécessaire pour produire la même quantité de produit quand les plantes sont cultivées en monocultures comparativement aux associations. Dans de telles circonstances, les associations donnent de meilleurs rendements comparativement à la performance des mêmes cultures en systèmes de monoculture.

3.3.8 Principes économiques rationnels

Un modèle peut être utilisé pour expliquer l'impact de la GIFS sur la réponse aux éléments nutritifs en termes de rendement en céréales et de rentabilité (Tableau 3.13):

- Les Réponse 1 et Réponse 2 représentent la réponse en termes de rendement en céréales à l'apport d'engrais azoté dans le champ d'un agriculteur. La Réponse 2 est plus élevée que la Réponse 1 en raison de l'effet d'autres composantes de la GIFS sur la réponse à l'engrais azoté (par exemple, fractionnement et calendrier d'application de l'engrais, et usage d'un germoplasme qui répond mieux à l'engrais).

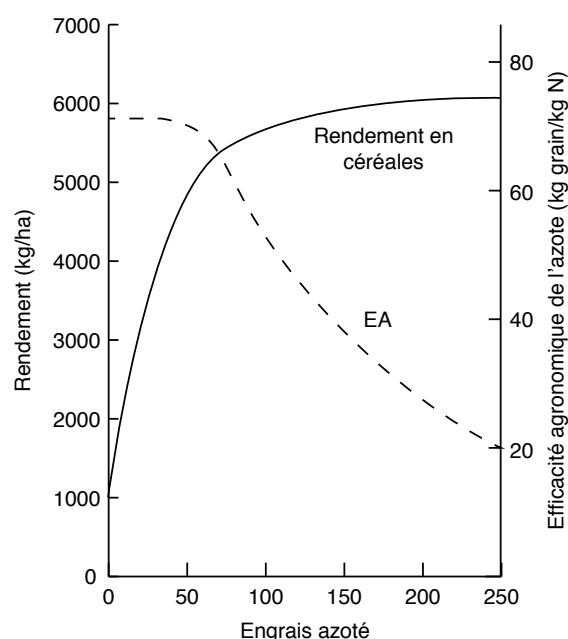


Figure 3.12 Diagramme montrant le lien conceptuel entre le taux d'application de l'engrais, le rendement et l'efficacité agronomique.

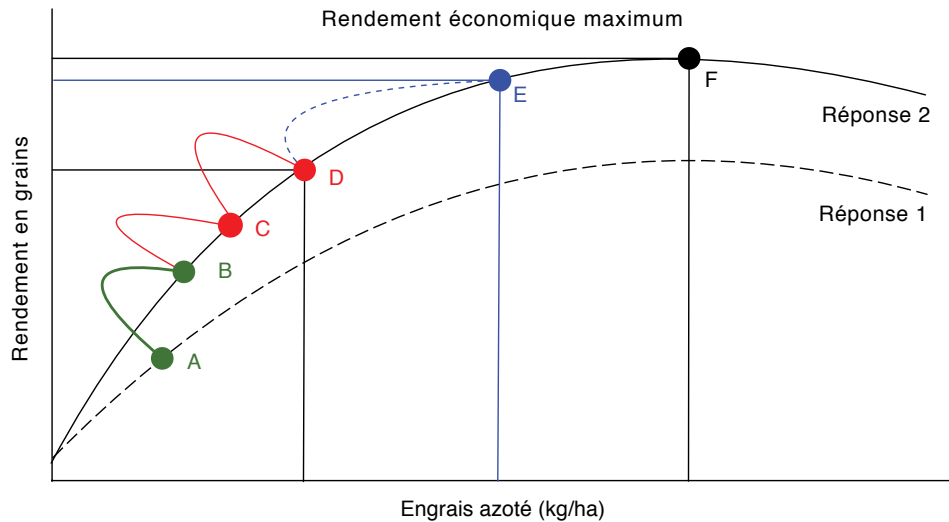


Figure 3.13 Relations entre le taux d'application de l'azote et le rendement en grains.

- L'agriculteur peut passer du point A au point B en adoptant des facteurs qui améliorent la réponse à l'engrais azoté (par exemple, fractionnement et période d'application, choix d'un génotype qui répond mieux, population des plants améliorée).
- L'agriculteur peut améliorer le rendement en grains et les profits en augmentant le taux d'application de l'engrais azoté en complément à un fractionnement et un calendrier amélioré d'application d'engrais azoté (par exemple, passer du point B au point C)
- Le Point F représente le rendement *agronomique* maximal et le Point E le rendement *économique* maximal, déterminé par le ratio du coût de l'engrais azoté par rapport au coût des céréales et la forme de la courbe de réponse.
- L'agriculteur peut augmenter les rendements en grains et les profits en augmentant le taux d'application d'engrais azoté jusqu'au point du rendement économique maximum (par exemple, passer du point C au point D), mais avec chaque application supplémentaire d'engrais, le revenu en kilogrammes du rendement par kilogramme d'engrais utilisé décroît. Par conséquent passer au point de rendement économique maximal serait considéré trop risqué par certains agriculteurs.
- Il existe une marge d'utilisation d'engrais dans laquelle l'efficacité agronomique, bien qu'en baisse, est toujours acceptable et dans laquelle les rendements économiques sont positifs (c'est-à-dire, entre les points B et D). La meilleure position pour l'agriculteur entre ces points dépend d'un ensemble de facteurs spécifiques à chaque exploitation agricole.
- Passer du point E au point F n'est pas économique car le revenu additionnel provenant de l'accroissement de rendement n'est pas supérieur au coût de l'utilisation supplémentaire d'engrais!

3.4 Conclusions

La GIFS contribue à la viabilité parce que les pratiques agronomiques et de gestion de la fertilité des sols maintiennent la fertilité du sol en:

- se focalisant sur l'utilisation efficace d'éléments nutritifs (mesurée en termes d'efficacité agronomique);
- minimisant la perte de nutriments naturels et ceux ajoutés par le recours à des techniques appropriées de conservation du sol; et
- en améliorant la fertilité du sol à travers toute l'exploitation.

Dans cette section nous avons examiné une définition de la GIFS et exploré ses principes.

L'objectif est de renverser la spirale descendante du déclin de la fertilité des sols et du rendement (Tableau 3.1) et de la transformer en une spirale ascendante où la fertilité et les rendements augmentent grâce à l'utilisation combinée de ressources organiques et d'engrais minéraux (Tableau 3.14).

Dans la section suivante nous aborderons les pratiques utiles de gestion de la fertilité des sols en détail.

3.5 Liste d'ouvrages à lire

Cette liste sert de guide de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d'une explication *en italique*. Là où la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Union africaine (2006) Déclaration d'Abuja sur les engrais pour une révolution verte en Afrique. Union africaine, Addis Abeba. Téléchargée en août 2012 du site: <http://www.nepad.org/foodsecurity/knowledge/doc/1815/abuja-declaration-fertilizer-african-green-revolution>.

La Déclaration d'Abuja est disponible en ligne.

Bationo, A. (2008) *Integrated Soil Fertility Management Options for Agricultural Intensification in the Sudano-Sahelian Zone of West Africa*. Academy Science publishers, Nairobi.

Un livre sur la gestion intégrée de la fertilité des sols en zone Soudano-Sahélienne en Afrique de l'Ouest.

Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J., Maina, F. and Kihara, J. (eds) (2011) *Inovations as Key to the Green Revolution in Africa – Exploring the Scientific Facts*. Springer, Dordrecht, 1363 pp.

Communications issues d'un colloque sur l'évaluation du potentiel et de la faisabilité des intrants externes, d'un sol amélioré et d'une gestion des cultures en vue de réussir une révolution verte en Afrique.

Bationo, A., Waswa, B., Okeyo, J., Maina, F., Kihara, J. and Mokwunze, U. (eds) (2011) *Fighting Poverty in Sub-Saharan Agriculture: the Multiple Roles of Legumes in Integrated Soil Fertility Management*. Springer, Heidelberg, 246 pp.

Une collection d'articles sur les rôles multiples des légumineuses dans le cadre de la gestion intégrée de la fertilité des sols.

Dudal, R. (2002) Forty years of soil fertility work in sub-Saharan Africa. In: Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., Merckx, R. (Eds.), *Integrated Plant Nutrient Management in sub-Saharan Africa: From Concept to Practice*. CAB International, Wallingford, pp. 7–21.

Un aperçu historique de la recherche sur la fertilité des sols en Afrique sub-saharienne.

Giller, K.E., Rowe, E., de Ridder, N., van Keulen, H. (2006) Resource use dynamics and interactions in the tropics: Scaling up in space and time. *Agricultural Systems* 88, 8–27.

Cet article introduit et aborde les relations entre la situation de la fertilité du sol et l'utilisation efficace des ressources, porte une attention particulière sur les gradients et les sols dégradés non-sensibles.

Lövenstein, H., Lantinga, E., Rabbinge, R. and van Keulen, H. (1995) *Principles of production ecology: text for course F300-001*. 121. Wageningen: Department of Theoretical production ecology, Wageningen Agricultural University. Retrieved August 2012 from <http://www.pame.wur.nl>

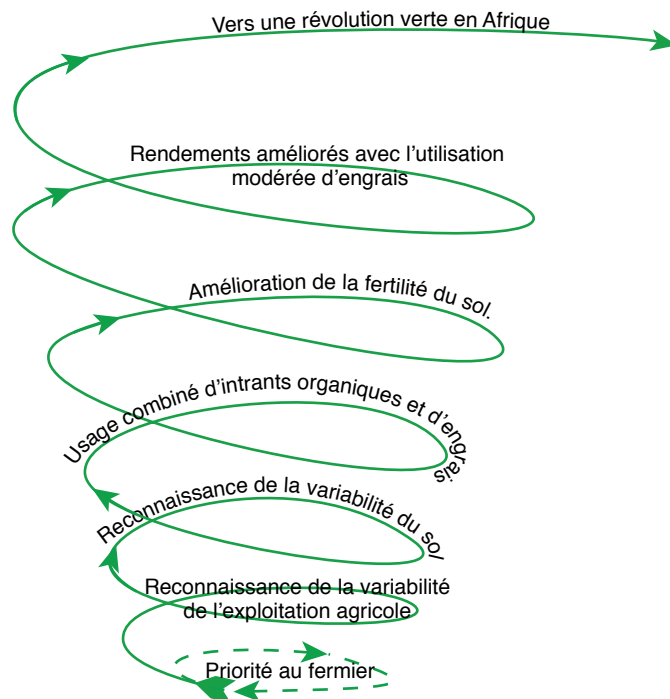


Figure 3.14 La spirale de fertilité descendante illustrée au Tableau 3.1 peut être inversée par une mise en œuvre prudente des composantes de la GIFS

Les principes d'écologie de production sont expliqués en détail dans ce cours préparatoire de premier cycle disponible en ligne.

Tian, G., Ishida, F., Keatinge, D., Carsky, R. and Wendt, J. (Eds.) (2000) Sustaining Soil Fertility in Africa. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, 321 pp.

Une collection d'articles sur la gestion de la fertilité des sols en Afrique de l'Ouest.

Tittonell, P., Giller, K.E., submitted. When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *Field Crop Res.*

La figure 3.9 est présentée et discutée dans cet article.

Tittonell, P., Vanlauwe, B., Corbeels, M., Giller, K.E. (2008) Yield gaps, nutrient use efficiencies and response to fertilisers by maize across heterogeneous smallholder farms of western Kenya. *Plant and Soil* 313, 19–37.

Cet article met en exergue les liens entre les gradients de la fertilité des sols, la gestion des cultures et l'utilisation agronomique efficiente des nutriments pour le maïs tel qu'indiqué dans le tableau 3.8.

Tittonell, P., Zingore, S., van Wijk, M.T., Corbeels, M.C., Giller, K.E. (2007) Nutrient use efficiencies and crop responses to N, P and manure applications in Zimbabwean soils: Exploring management strategies across soil fertility gradients. *Field Crops Research* 100, 348–368.

Avec Zingore et al. (2007) cet article analyse l'origine des gradients de la fertilité du sol et leur importance par rapport à l'efficacité agronomique des engrais minéraux et organiques.

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L. (2010) Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook on Agriculture* 39, 17–24.

En plus de définir la GIFS, cet article explique les concepts majeurs de la GIFS et il est la source des tableaux 3.3 et 3.4.

Zingore, S., Murwira, H.K., Delve, R.J., Giller, K.E. (2007) Soil type, historical management and current resource allocation: three dimensions regulating variability of maize yields and nutrient use efficiencies on African smallholder farms. *Field Crops Research* 101, 296–305.

Source du tableau 3.10, avec Tittonell et al. (2007) cet article examine l'origine des gradients de la fertilité des sols et leur importance par rapport à l'efficacité agronomique des engrais organiques et du fumier organique.

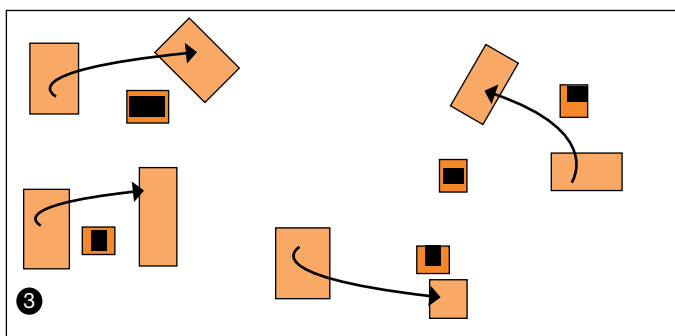
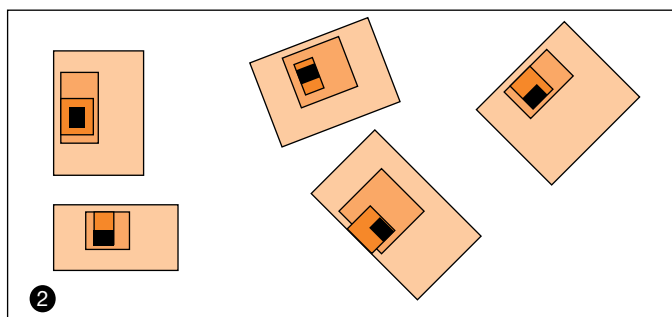
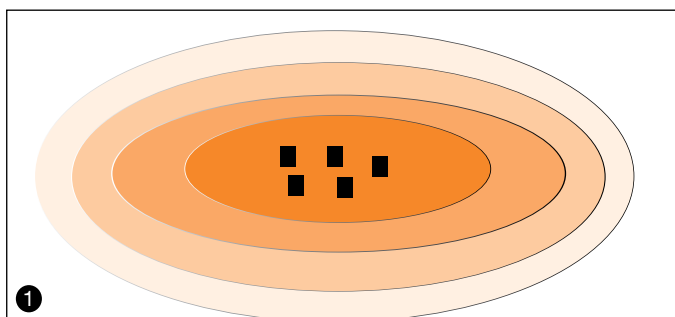


Photo 3.1 Les champs des agriculteurs d'Afrique subsaharienne sont généralement hétérogènes en termes de fertilité des sols, mais les modes de distribution des sols varient largement. Au sein des systèmes à *cercles concentriques* (1), la fertilité du sol diminue avec la distance à partir du village. Dans les systèmes de regroupement des exploitations (2) chaque fermier possède des champs d'une fertilité variable (champs proches de la maison du paysan et champs éloignés). Au sein des systèmes de jachère, la fertilité du sol est plus liée au temps pendant lequel une parcelle est mise en jachère.



Photo 3.2 En général nous pouvons identifier trois types de sols sur les exploitations individuelles en termes de réponse aux engrais minéraux – des sols sensibles, moins sensibles et non sensibles. Les champs proches de la maison du paysan sont généralement moins réponsants parce qu'ils ont bénéficié dans le passé d'application de déchets domestiques, de résidus de cultures et de fumier animal. Sur cette ferme dans la province occidentale du Kenya, cependant, le champ proche de la maison du paysan (1) a bien répondu à l'engrais minéral, tandis que le champ éloigné (2) a moins bien répondu, ceci est dû en partie à l'infestation très persistante du chientent (3)



Photo 3.3 Faible réponse du maïs (1) et des légumineuses (2) à l'engrais sur des sols dégradés. De grandes quantités de résidus organiques doivent être appliquées si on espère obtenir une quelconque réponse à l'engrais.

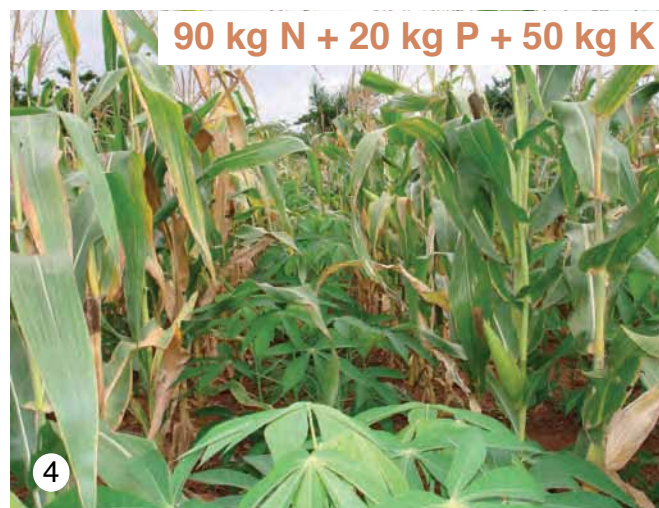
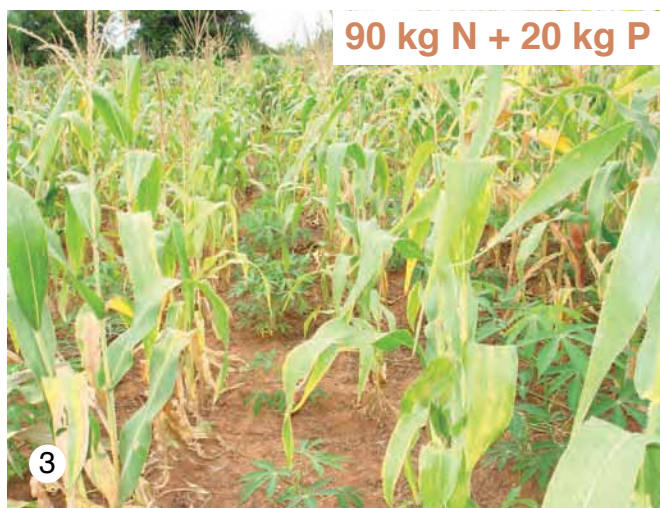


Photo 3.4 Démonstration sur le terrain visant à montrer les effets de différentes combinaisons d'engrais azoté, phosphaté et potassique sur le maïs intercalé avec le manioc. Avec l'apport d'engrais potassique et phosphaté mais sans engrais azoté (1), les plantes sont petites et les feuilles sont d'une couleur vert-jaune. Avec l'apport d'engrais azoté et potassique mais sans engrais phosphaté (2), les plantes sont plus grandes mais les symptômes de déficience en phosphore sont évidents. Avec l'apport de l'engrais azoté et phosphaté mais sans engrais potassique (3), les plantes manifestent des symptômes de déficience en K. Quand les engrais azotés, phosphatés et potassiques sont appliqués conjointement, la croissance du maïs et du manioc est meilleure par rapport aux autres trois cas de traitement, suggérant que les trois éléments nutritifs sont requis pour un rendement optimal.

4 Pratiques de gestion de la fertilité des sols



4.1 Introduction

Dans cette section, nous examinons en détail: (i) l'utilisation d'engrais organiques et minéraux; (ii) comment calculer l'efficacité de l'utilisation d'engrais; (iii) comment appliquer les engrais et minimiser les pertes de nutriments; (iv) l'importance d'utiliser le germoplasme amélioré et adapté; (v) comment tirer parti des avantages des légumineuses fixatrices d'azote; et (vi) les bénéfices des champignons mycorhiziens. Nous abordons également l'agriculture de conservation et l'agriculture biologique, ainsi que la nécessité d'adapter les technologies pour répondre aux besoins spécifiques des exploitations. Enfin, nous soulignons la nécessité de l'analyse économique pour juger si oui ou non les stratégies GIFS offrent des avantages économiques à l'agriculteur.

4.2 Utilisation d'intrants organiques

Les intrants organiques utilisés dans la gestion de la fertilité des sols sont généralement composés de déjections animales (fumier de ferme), résidus de cultures, litière de forêt, déchets organiques des ménages, matériel végétal décomposé (compost), et toute biomasse végétale récoltée à l'intérieur ou à l'extérieur de l'environnement de la ferme pour l'amélioration de la productivité du sol. Dans les zones urbaines et périurbaines, les intrants organiques peuvent aussi provenir des déchets organiques industriels et des boues d'épuration.

Les ressources organiques assurent plusieurs fonctions dans le sol, allant de leur influence sur la disponibilité des nutriments à la modification de l'environnement du sol dans lequel les plantes croissent. Les intrants organiques provenant des résidus végétaux fournissent le gros des éléments nutritifs essentiels, mais généralement en quantités insuffisantes. En raison de leur richesse en carbone, les ressources organiques fournissent une source d'énergie pour les microorganismes qui sont à la base de divers processus biologiques pour renforcer la transformation des nutriments et d'autres paramètres de qualité du sol.

Au fur et à mesure que ces matières organiques se décomposent (ou se dégradent) dans le sol, elles contribuent à la formation de la matière organique du sol, qui est généralement considérée comme le pilier de la fertilité des sols. La plupart des impacts durables des intrants organiques sur les sols sont liés aux fonctions de la matière organique des sols. Durant la décomposition, les matières organiques interagissent avec les minéraux du sol pour former des substances complexes qui agissent sur la disponibilité des nutriments (par exemple en liant des substances chimiques pouvant être toxiques, telles que l'aluminium ou en provoquant une meilleure libération du phosphore lié dans les couches minéralisées superficielles du sol).

4.2.1 Les matières organiques en tant que sources d'éléments nutritifs

Le rôle des matières organiques en tant que sources de nutriments s'appuie sur les processus biologiques de décomposition, qui impliquent une dégradation biochimique des tissus organiques morts en formes constituantes inorganiques, principalement par le biais de l'action des microorganismes. Le processus par lequel les éléments nutritifs essentiels sous des formes non disponibles sont convertis en leurs formes inorganiques qui sont disponibles pour être utilisées par des plantes en croissance s'appelle la minéralisation. C'est pendant la décomposition des matières organiques dans les sols que la matière organique du sol est formée et que les nutriments sont libérés. La matière organique du sol peut donc être considérée comme étant composée de matières organiques de différentes origines qui sont à différents stades de décomposition grâce à l'action des microorganismes du sol.

Les microorganismes du sol aussi se développent, se multiplient et meurent au cours du processus de décomposition et à leur tour, contribuent aux changements dynamiques dans la formation de la matière organique du sol et dans la minéralisation (libération d'éléments nutritifs). Les quantités de matière organique du sol formée ainsi que les quantités d'éléments nutritifs libérés dépendent de la quantité et de la fréquence des intrants organiques appliqués au sol.

Sous une végétation naturelle vierge telle que les forêts permanentes ou les terres de pâturage, il y a généralement un équilibre entre la matière organique apportée au sol sous forme de litière végétale et l'état de la

matière organique du sol, parce que les nutriments sont bien recyclés et ne sont pas exportés par des cultures. Lorsque le sol est utilisé pour planter des cultures, cependant, le taux de formation de la matière organique du sol et de libération d'éléments nutritifs est inférieur à la demande en nutriments des cultures, notamment quand les agriculteurs visent des rendements destinés à la commercialisation. Des efforts supplémentaires sont donc nécessaires pour apporter plus de matière organique au sol, requérant l'utilisation d'engrais minéraux pour augmenter la quantité des ressources organiques disponibles pour la production des cultures.

La matière organique du sol est une source importante d'azote (N), de phosphore (P) et de soufre (S) dans la production des cultures. L'apport de ces éléments nutritifs par la matière organique du sol dépend d'un certain nombre de facteurs dont:

- La qualité et la fréquence de l'apport des intrants organiques au sol;
- La qualité des ressources organiques; et
- L'effet du type de sol (par exemple la texture et la minéralogie) et les conditions environnementales (par exemple l'humidité et la température) qui fournissent un environnement dans lequel les processus de décomposition et de minéralisation se produisent.

Bien que les conditions environnementales influent beaucoup sur le niveau d'activité des microorganismes qui facilitent la décomposition de la matière organique, l'autre facteur clé est la composition chimique ou la "qualité" des intrants organiques. Les microorganismes (microbes) consomment du carbone (C) comme source d'énergie et de l'azote (N) pour la synthèse des protéines et la croissance de la population. Le ratio de ces deux éléments chimiques dans une matière organique donnée, qu'on appelle le ratio C/N, détermine ainsi le taux de minéralisation.

En règle générale, les intrants organiques d'une teneur en N > 2.5% ou avec un ratio C/N < 16 libèrent les nutriments à court terme, pour permettre la fourniture des éléments nutritifs aux cultures en croissance au cours de la même saison. La libération des nutriments peut atteindre le niveau maximal trois semaines après l'incorporation des intrants. La plupart des matières organiques à forte capacité d'accumulation d'azote, telles que la biomasse des légumineuses fixatrices d'azote avec une teneur tissulaire en N \geq 2% et les résidus de cultures compostés, se trouvent dans cette catégorie.

En revanche, les intrants organiques d'une teneur en N < 2.5% ou d'un ratio C/N > 16 immobilisent (pratiquement enferment) les nutriments pendant de longues périodes. Ceci en fait signifie que lorsqu'une matière organique dont le ratio C/N est très élevé comme la paille est ajoutée au sol, elle immobilise N pendant une longue période parce que les microbes du sol prennent le dessus sur les plantes en croissance et enferment le rare N de l'intrant organique en décomposition et du sol dans la production de leurs propres tissus.

Ceci explique pourquoi l'incorporation des résidus de maïs dans le sol provoque souvent une carence en N à moins que des quantités suffisantes d'engrais soient ajoutées comme supplément d'apport d'azote. La plupart des résidus de céréales (maïs, blé, sorgho et riz), la litière forestière et les fumiers animaux font partie de cette catégorie.

Les polyphénols (tanins) et la lignine sont les deux autres composantes chimiques des intrants organiques qui influencent la libération des nutriments des matières organiques en décomposition quand elles sont présentes en grandes quantités. La minéralisation nette de l'azote des matières contenant des polyphénols et de la lignine en grandes quantités se fait très lentement. Certains groupes de polyphénols s'attachent à l'azote de façon irréversible. La lignine est la principale composante du bois, une structure complexe de carbone qui est difficile pour les microorganismes à décomposer.

En utilisant ces paramètres de qualité chimique, il est donc possible de classer les intrants organiques sur une échelle suivant la facilité avec laquelle ils minéralisent et libèrent les nutriments devant être absorbés par les plantes en croissance. Si une analyse de laboratoire est disponible, un simple diagramme d'aide à la prise de décision peut être utilisé pour classer les résidus en fonction de la teneur en N et en lignine/polyphénol (Figure 4.1). Une méthode plus simple s'appuie sur la couleur, la teneur en fibre et le goût des matières (Figure 4.2).

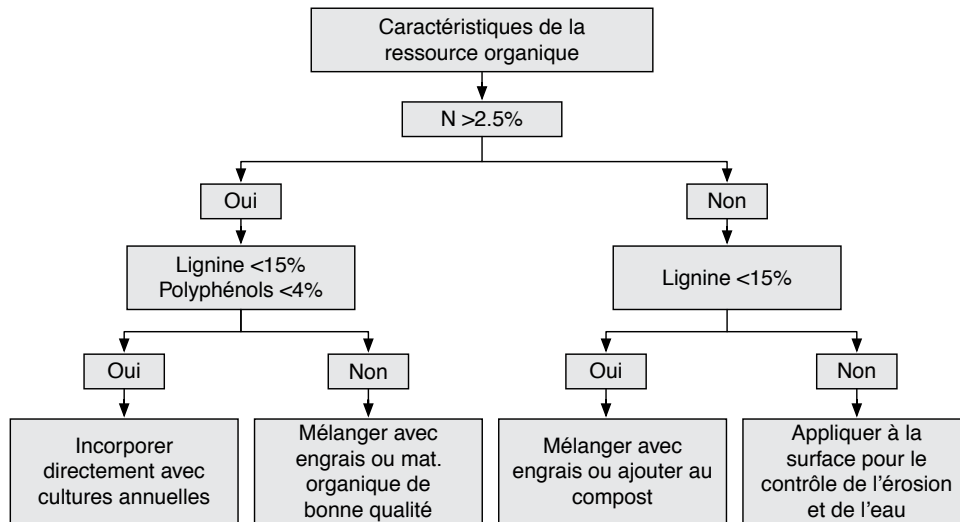


Figure 4.1 Un diagramme d'aide à la prise de décision pour la gestion des ressources organiques dans l'agriculture.

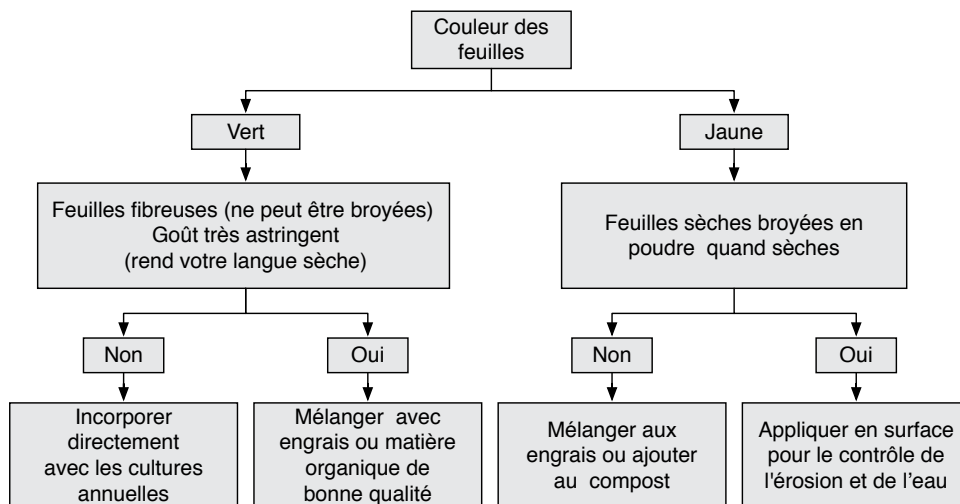


Figure 4.2 Une version du diagramme d'aide à la prise de décision de la Figure 4.1 facile à comprendre pour un agriculteur.

4.2.2 Rôle de la matière organique du sol dans la fertilité des sols

En apportant directement des formes disponibles de C qui stimulent l'activité biologique du sol et contribuent à la formation de la matière organique du sol, les intrants organiques influent aussi sur les propriétés chimiques et physiques du sol. Les rôles de la matière organique du sol dans l'amélioration de la productivité des sols sont entre autres:

- la régulation des taux et des quantités d'éléments nutritifs libérés dans le sol pour leur utilisation par la plante;
- l'amélioration du taux d'infiltration de l'eau dans le sol et de la capacité de rétention du sol;
- l'augmentation de la capacité d'échange cationique, ou la capacité du sol à stocker les éléments nutritifs;
- l'amélioration de l'agrégation du sol (les particules de la matière organique du sol agissent comme liants), en améliorant la structure du sol, en réduisant la densité apparente et en promouvant une bonne aération; et
- la liaison des éléments toxiques des sols pour minimiser leurs impacts sur les plantes en croissance.

4.2.3 Avantages et inconvénients des intrants organiques comme engrais

Les intrants organiques présentent plusieurs avantages dans la gestion de la fertilité des sols. Outre l'apport des nutriments essentiels aux plantes, ils contribuent directement à la formation de la matière organique du sol et ses avantages associés. Les nutriments sont libérés lentement des ressources organiques comparativement aux engrais minéraux (inorganiques), et fournissent un apport continu de nutriments tout au long de la campagne agricole. Les pertes d'éléments nutritifs (par exemple par lessivage) sont donc minimisées et les plantes se développent bien en ayant une demande suffisante vis-à-vis des nutriments libérés. Les intrants organiques modifient l'environnement du sol, en améliorant directement ses propriétés biologiques et souvent en améliorant sa productivité générale.

L'inconvénient majeur des intrants organiques est leur teneur en nutriments relativement faible. Par exemple, la plupart des ressources organiques utilisées dans les champs contiennent entre 0,5 et 2,5% de N, ou 5 à 25 g de N/kg, alors que les engrais minéraux ont une teneur de plus de 100 à 460 g de N/kg. Par conséquent, les intrants organiques doivent être utilisés en grande quantité pour pouvoir fournir aux plantes suffisamment de nutriments pour leur croissance. Par exemple, environ 2000 kg de matière sèche de biomasse à base de légumineuses de bonne qualité apportent environ 50 kg de N, soit assez de N pour produire environ 1 t de grains de maïs. La même quantité de N peut être fournie par environ 90 kg ou deux sacs d'engrais à base d'urée.

Néanmoins, de telles grandes quantités ne sont pas toujours faciles à trouver dans les systèmes d'exploitation agricole des petits exploitants à ressources limitées. Par exemple, il faut un sol raisonnablement fertile pour produire une grande quantité de biomasse même à partir de légumineuses tolérantes au stress. L'agriculteur peut être confronté au dilemme entre maintenir des résidus de cultures dans le champ pour améliorer la fertilité du sol et les enlever pour les utiliser comme fourrage pour le bétail ou destiné à la vente. Probablement qu'il sait très bien que le fait d'enlever les résidus de cultures empêche la restitution des nutriments au sol mais, en même temps, il préfère donner ces résidus à son bétail, ce qui lui permet d'augmenter un capital pouvant ultérieurement être converti en liquidités.

La gestion des intrants organiques dans les champs exige aussi d'importants investissements dans la main-d'œuvre pour leur transport et leur application. La biomasse d'engrais verts peut être produite in situ (c'est-à-dire dans les champs où elle sera utilisée), mais cette production peut impliquer des investissements dans des engrais minéraux dans un champ qui pourrait être utilisé plutôt pour cultiver une plante destinée à la consommation familiale ou à la vente. Ces pratiques ne sont souvent possibles que si l'on s'attend à un rendement considérable du système de culture qui fera l'objet d'un apport d'intrants organiques.

Il convient de noter que les intrants organiques peuvent également intensifier l'activité des insectes ravageurs et d'autres organismes du sol qui sont nuisibles aux cultures en croissance, faisant encourir des dépenses supplémentaires pour lutter contre les maladies et les ravageurs.

4.3 Utilisation d'engrais minéraux

Un engrais est une matière qui contient au moins un des nutriments des plantes sous forme chimique qui, lorsqu'il est appliqué au sol, devient soluble dans les solutions du sol et 'disponible' pour les racines des plantes. Certains engrais tels que l'urée, le chlorure de potassium (KCl) et le phosphate diammonique (DAP) sont entièrement solubles dans l'eau, alors que d'autres tels que le phosphate naturel et la dolomie sont partiellement solubles et libèrent les nutriments lentement sur plusieurs mois ou années.

Le but de l'utilisation des engrais est d'apporter des nutriments aux plantes. A titre indicatif, les engrais devraient contenir au moins 5% d'un nutriment essentiel ou plus sous une forme immédiatement disponible. La teneur en éléments nutritifs des engrais minéraux est toujours indiquée sur l'étiquette du sac. La teneur en phosphate (P), potassium (K) et magnésium (Mg) est exprimée sous forme d'oxyde, c'est-à-dire P_2O_5 , K_2O et MgO . Les nutriments secondaires et les micronutriments sont souvent contenus dans les engrais composés.

4.3.1 Matières fertilisantes

Les éléments les plus essentiels qu'ils soient macro ou micro peuvent être obtenus à partir des engrais. L'engrais de fonds ou de "démarrage" est appliqué au moment du semis, généralement suivi d'une seconde application (qu'on appelle "fumure d'entretien") de N plus tard au cours de la saison agricole. Les engrais de fonds contiennent des nutriments (par exemple N, P, K et Mg) nécessaires durant les stades initiaux de la croissance de la plante ou des nutriments qui ne sont pas facilement perdus par le sol.

Les engrais azotés

Il convient de rappeler que tout l'azote utilisé par les plantes provient finalement de l'azote atmosphérique. Alors que les légumineuses convertissent le N_2 atmosphérique en N minéral par fixation biologique, l'engrais azoté est l'azote atmosphérique (N_2) atmosphérique en ammoniac (NH_3) par le procédé industriel Haber-Bosch qui utilise le gaz naturel comme source d'énergie.

L'engrais azoté le plus courant est l'urée mais les engrais composés NPK sont souvent utilisés comme source de N pour l'application d'engrais de fonds. Les autres engrais azotés sont entre autres l'ammoniac anhydre, le nitrate d'ammoniac calcaire, le nitrate d'ammoniac et le sulfate d'ammoniac.

Le nitrate (NO_3^-) et l'ammonium (NH_4^+) sont les sources majeures de N libérées à partir des engrais azotés et assimilables par les plantes. Les anions de nitrate sont directement disponibles pour les plantes, mais ils sont aussi facilement lessivés de la zone racinaire. L'ammoniac peut être directement absorbé par la plante ou oxydé d'abord en nitrite par un processus qu'on appelle la nitrification et ensuite transformé en nitrate par les micro-organismes nitrifiants.

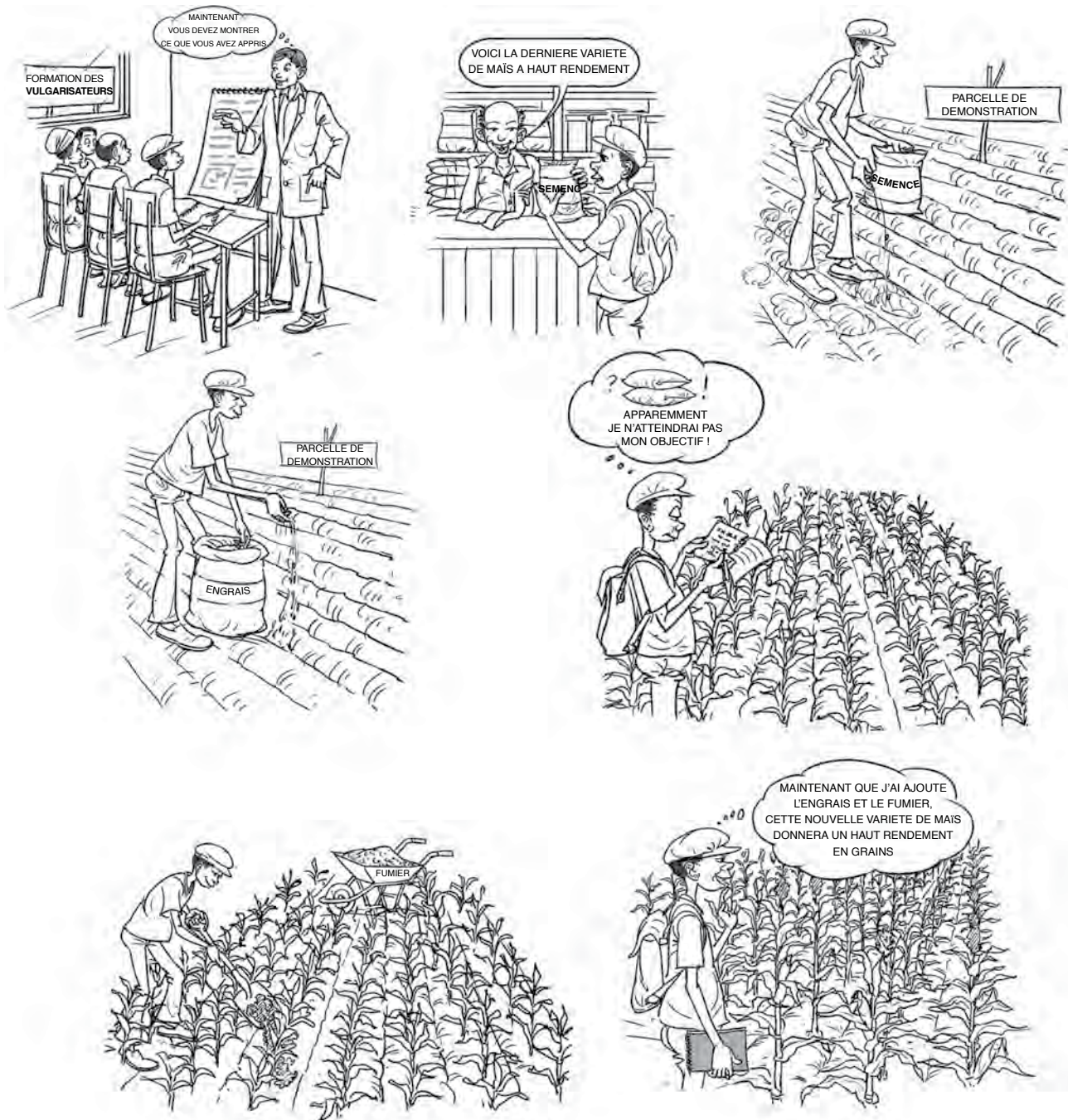
La nitrification provoque la libération des ions d'hydrogène (H^+), qui mène à l'acidification du sol. Si tous les ions de nitrate produits par nitrification sont absorbés par les racines de la plante, l'excrétion de OH^- par la culture neutralise les ions d'hydrogène. En général, seule une petite partie du nitrate total produit est absorbée par les racines de la plante.

Les engrais phosphatés

Les engrais phosphatés sont dérivés de minerai de phosphate extrait de roches sédimentaires ou ignées. Le phosphate naturel d'origine sédimentaire est généralement plus réactive avec le sol que celle d'origine ignée et donc plus appropriée pour une application directe, à condition qu'elle soit broyée en petites particules pour qu'il y ait une large surface sur les particules de la roche phosphatée capables de réagir avec le sol et libérer le P assimilable par les cultures. Les phosphates naturels sont très variables à la fois en termes de teneur en P et de disponibilité de P.

Il y a plusieurs inconvénients à utiliser le phosphate naturel pour une application directe:

- le phosphate naturel a une teneur en P relativement faible par rapport à la plupart des engrais fabriqués en usine, ce qui augmente les frais de transport et la main-d'œuvre pour son application.
- La poudre très raffinée qui doit être produite pour garantir une solubilité suffisante peut être difficile à manipuler et à appliquer (mais certains phosphates naturels par exemple le Minjingu sont disponibles sous forme de granulés).
- Le sol doit être suffisamment acide (généralement avec un pH <5,5) pour pouvoir réagir avec le phosphate naturel et libérer du P assimilable pour les cultures.
- Le taux de libération du P d'un phosphate naturel pourrait être trop lent pour satisfaire les besoins des cultures. Le phosphate naturel est une bonne source de P pour les cultures pérennes qui exigent une libération lente et continue sur une longue période. Le phosphate naturel a été aussi utilisé pour recapitaliser les réserves du sol en P dans les sols dégradés. Toutefois, dans la plupart des systèmes de culture, les engrais phosphatés solubles tels que le triple superphosphate (TSP), le phosphate diammonique (DAP) sont plus appropriés pour la production des cultures annuelles.



La teneur totale en P_2O_5 du phosphate naturel est d'une utilité limitée en tant que mesure de la quantité de P qui sera fournie pour absorption par les cultures. En revanche, il est plus utile de mesurer la quantité de P soluble dans l'acide citrique et formique ainsi que la finesse, qui également influe sur le taux de libération de P (Tableau 7.39).

De façon générale, le phosphate naturel dérivé des roches sédimentaires est plus soluble et pourvoit plus de P que celui dérivé des sources ignées. Alors que le phosphate naturel est parfois utilisé pour une application directe, elle est plus communément utilisée comme matière première dans la fabrication des engrais phosphatés solubles. Dans le processus de fabrication, le phosphate naturel est mis en réaction avec l'acide sulfurique ou phosphorique pour produire des engrais phosphatés commerciaux qui contiennent une grande quantité de P assimilable par les cultures. Le phosphate naturel contient généralement environ 32% de P_2O_5 comparativement aux engrais phosphatés, tels que le TSP, qui ont une teneur en P_2O_5 de 46%, et le superphosphate simple (SSP), qui contient

20% de P_2O_5 . Alors que le phosphate naturel est peu soluble, les engrais phosphatés fabriqués sont complètement solubles dans le sol.

Les engrais potassiques

Tous les engrais potassiques sont fabriqués à partir d'importants dépôts de minéraux de potassium solubles à l'eau qui se sont accumulés à la suite de l'évaporation des mers peu profondes ou des lacs naturels au cours des temps géologiques. Les sels de potassium les plus utilisés dans l'agriculture pour produire des engrais potassiques sont des sels doubles qui contiennent aussi des quantités importantes de Mg et de S. Les engrais potassiques les plus disponibles sont le chlorure de potassium (KCl) qui contient 60% de K_2O et le sulfate de potassium (K_2SO_4), qui contient 50% de K_2O .

Le sulfate de potassium coûte généralement plus cher que le chlorure de potassium, mais il est plus approprié à utiliser pour les cultures à forte valeur ajoutée dont la teneur en sucre est importante (ananas, canne à sucre, cultures fruitières) et pour le tabac où la teneur en chlore dans le produit doit être minimisée.

Les engrais composés

Les engrais composés peuvent être divisés en trois types::

- **les engrais complexes** sont destinés à l'horticulture qui exige des engrais de grande qualité. Ils sont généralement trop onéreux pour être utilisés dans l'agriculture à petite échelle en Afrique sub-saharienne.
- **les engrais compactés** sont fabriqués en mélangeant des engrais simples compatibles pour produire une bouillie à partir de laquelle un produit granulé est préparé. La production des engrais composés coûte moins cher que celle des engrais multinulements complexes.
- **Les engrais de mélange** sont préparés à partir d'un mélange physique de différents engrais pour produire une composition spécifique de nutriments. La production des engrais de mélange est moins coûteuse que celle des engrais compactés.

Les engrais compactés et les engrais de mélange sont souvent produits avec une teneur en nutriments adaptée à certaines cultures comme 8-14-7 (maïs), 5-18-10 (coton) et 5-7-15 (tabac) (Tableau 7.33). D'autres engrais compactés et de mélanges (par ex. 15-15-15, 12-12-17+2, 15-15-6+4) peuvent être utilisés pour plusieurs cultures.

Il est important de comparer le coût de différentes sources d'engrais. Les engrais composés sont généralement plus chers que les engrais simples en termes de dollars par kilogramme de nutriment, à cause des coûts de fabrication qu'il faut prendre en compte. Les engrais de mélange sont en général légèrement plus coûteux que les engrais simples, parce que le processus de mélange n'est pas onéreux. Les engrais de mélanges ont tendance à se tasser en leurs différents éléments pendant le transport et pourraient exiger d'être mélangés avant leur application.

Certains fabricants vendent au détail de petits sacs (25 kg/sac ou moins) qui sont plus pratiques pour les petits exploitants que les sacs standard de 50 kg.

Exemple pratique

Il est toujours utile de comparer les engrais composés et les engrais simples pour savoir la source la moins onéreuse, tel qu'illustré dans l'exemple ci-après.

Un agriculteur veut comparer le coût d'application des nutriments sous forme d'engrais composé (15-10-12) avec celui d'un engrais simple (urée, TSP et KCl). La teneur en nutriments et le coût des engrais disponibles sont indiqués dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Teneur en nutriments et coût des engrais disponibles sur le marché

Engrais	Teneur en nutriment (%)			Prix (\$/sac de 50 kg)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Composé 15-10-12	15	10	12	32
Urée (46% N)	46	–	–	17
TSP (46% P ₂ O ₅)	–	46	–	22
KCl (60% K ₂ O)	–	–	60	30

Premièrement, nous calculons la quantité de N, P₂O₅ et de K₂O contenue dans un sac de 50 kg d'engrais composé 15-10-12:

- Un sac de 50 kg d'engrais composé 15-10-12 contient 7,5 kg de N, 5 kg de P₂O₅ et 6 kg de K₂O.

Pour fournir la même quantité de nutriments sous forme d'engrais nous devons appliquer:

L'urée (azote)

- 50 kg de composé (15-10-12) x 15% N = 7,5 kg de N
- 7,5 kg de N ÷ 46% N dans l'urée = 16,3 kg d'urée

TSP (phosphore)

- 50 kg de composé (15-10-12) x 10% P₂O₅ = 5 kg de P₂O₅
- 5 kg de P₂O₅ ÷ 46% P₂O₅ dans le TSP = 10,9 kg de TSP

KCl (potassium)

- 50 kg de composé (15-10-12) x 12% K₂O = 6 kg de K₂O
- 6 kg de K₂O ÷ 60% K₂O dans KCl = 10 kg de KCl

Nous pouvons maintenant calculer les coûts:

- Un sac de 50 kg d'engrais composé 15-10-12 coûte 32\$
- Un sac de 50 kg d'urée coûte 17\$ d'où 1kg coûte $17 \div 50 = 0,34$ et 16,3 kg coûtent $16,3 \times 0,34\$ = 5,54\$$
- Un sac de 50 kg de TSP coûte 22\$ d'où 1kg coûte $22 \div 50 = 0,44$ \$ et 10,9 kg coûtent $10,9 \text{ kg} \times 0,44\$ = 4,78\$$
- Un sac de 50 kg de KCl coûte 30\$ d'où 1kg coûte $30 \div 50 = 0,60$ \$ et 10,0 kg coûtent $10,0 \text{ kg} \times 0,60\$ = 6\$$

Coût total d'engrais simples = 5,54\$ + 4,78\$ + 6\$ = 16,32\$.

Le coût des nutriments fournis comme équivalent d'un sac d'engrais composé en tant qu'engrais simples est 16,32\$, soit une économie de 15,68\$. Il est également important de noter que la quantité totale d'engrais simples requise dans cet exemple est 37,2 kg, soit une plus petite quantité que les 50 kg d'engrais composé.

Dans cet exemple, les engrais simples coûtent moins cher. Le paysan peut cependant choisir d'appliquer l'engrais composé parce qu'il estime que l'avantage d'appliquer tous les nutriments à l'aide d'un seul engrais compense largement le coût additionnel de 15,68\$.

Les engrais de mélange et les autres engrais

Les engrais de mélange secs NPK peuvent être préparés en mélangeant physiquement des engrais simples granulés dans des proportions nécessaires pour fournir à la culture la bonne quantité de chaque nutriment. Le soufre et les micronutriments sont parfois ajoutés aux mélanges NPK, le cas échéant.

La plupart de mélanges NPK sont préparés en utilisant le P du phosphate diammonique. Le triple superphosphate granulé est utilisé pour fabriquer les engrais contenant le P et le S, mais ne peut pas être utilisé pour produire les engrais de mélange NPK parce qu'il est incompatible avec l'urée, la source d'engrais azoté la plus utilisée dans les

mélanges. Les mélanges sont préparés suivant les besoins spécifiques en nutriments des cultures. Par exemple, le manioc et la banane plantain exigent des mélanges contenant une grande quantité de K.

Les paysans peuvent aussi faire leurs propres mélanges à condition que les engrais soient compatibles (Tableau 7.34).

4.3.2 Amendements du sol

La chaux

Les amendements calcaires sont utilisés pour augmenter le pH des sols acides où les cultures présentent une intolérance à une forte saturation en aluminium échangeable, qui souvent (mais pas toujours) accompagne un faible pH du sol. En corrigeant le pH du sol et en apportant le calcium (Ca), la chaux améliore l'environnement du sol pour la croissance des cultures. Dans des sols très acides (pH <5,5), la toxicité de l'aluminium (Al) et du manganèse (Mn) est prévenue et la disponibilité du phosphore (P) et du molybdène (Mo) augmente à la suite de l'application de la chaux. Les autres processus microbiologiques, tels que la nitrification et la fixation de l'azote atmosphériques'améliorent également et le chaulage peut contribuer à améliorer les propriétés physiques du sol à cause de l'accroissement de l'activité microbienne. L'acidité est souvent associée à des sols très lessivés qui présentent une déficience en Ca et Mg de telle sorte que la chaux joue un rôle important en pourvoyant à ces nutriments.

L'amendement du sol le plus couramment utilisé est le calcaire ou le carbonate de calcium (CaCO_3), et tous les autres amendements du sol sont évalués en fonction de leur efficacité relative lorsqu'on les compare avec le carbonate de calcium (exprimé en équivalence en carbonate de calcium (ECC), où le CaCO_3 a une ECC de 100).

Les dépôts de calcaire sont disponibles partout au monde et ils sont généralement extraits grâce aux techniques d'exploitation à ciel ouvert à l'aide d'explosifs. Les morceaux de roche sont brisés en plus petits morceaux <2.5 cm et ensuite broyés ou pulvérisés. La qualité du calcaire commercial a généralement une ECC de 90 à 98%. Les autres amendements du sol sont notamment l'oxyde de calcium (CaO) avec une ECC de 180%, l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) avec une ECC d'environ 135% et la dolomie ($\text{CaMg(CO}_3)_2$) avec une ECC d'environ 110%.

On fait la distinction entre le calcaire dolomitique, qui contient à la fois le MgCO_3 et le CaCO_3 , et le calcaire calcitique, qui ne contient que de petites quantités de MgCO_3 . Sur certains sols, le calcaire calcitique peut provoquer une déficience en Mg s'il est appliqué en grande quantité.

Les besoins en chaux d'un sol dépendent de son niveau d'acidité et du niveau d' Al^{3+} échangeable qu'une culture donnée peut supporter. Ces besoins sont souvent calculés comme la quantité nécessaire pour réduire la saturation de l'Al à 15%. Les sols sablonneux ont une faible capacité de tampon de sorte que de petites quantités de chaux sont suffisantes pour pourvoir au Ca et corriger l'acidité. En revanche, d'importantes quantités de chaux sont nécessaires pour réduire la saturation en Al dans des sols argileux hautement acides en raison de leur grande capacité de tampon. Les besoins en chaux sont calculés en utilisant des formules empiriques qui sont une fonction de la saturation en Al sur le complexe d'échange du sol.

Le gypse

Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est une matière minérale qui se présente comme un dépôt naturel dans des régions semi-arides et arides, peu soluble à l'eau. Le gypse est utilisé pour réhabiliter les sols sodiques qui, par définition, ont un pourcentage très élevé de sodium sur le complexe d'échange cationique (soit >15%). Ces sols sodiques ont souvent une structure du sol dégradée en raison de l'effondrement des minéraux argileux. Le gypse est généralement incorporé au cours de la préparation du sol à une profondeur de 0 à 15 cm. Le gypse réagit avec les sels de sodium (Na) (par exemple le carbonate de sodium) et remplace le Na échangeable sur le complexe d'échange, qui est alors lessivé comme sulfate de sodium.

Le gypse est également utilisé pour corriger la carence en Ca dans les cultures, comme l'arachide, qui ont besoin de beaucoup de Ca pour la formation des gousses.

4.4 Efficacité de l'utilisation de l'engrais

La plupart des sols ne peuvent pas fournir tous les nutriments essentiels en quantités suffisantes pour permettre une bonne croissance des cultures, et l'application d'engrais est l'un des moyens les plus efficaces pour accroître l'absorption des nutriments et améliorer les rendements.

Les nutriments appliqués au sol sont soit:

- absorbés par la culture;
- conservés dans le sol comme stocks de nutriments du sol;
- perdus par divers processus.

Les engrais génèrent des bénéfices directs en accroissant les rendements des cultures et des avantages indirects en augmentant la quantité des résidus de cultures disponibles pour restituer la matière organique du sol ou à utiliser comme fourrage pour le bétail. Lorsqu'il y a une plus grande quantité de fourrage pour le bétail, ce dernier produit plus de déjections animales qui contiennent des nutriments pouvant être recyclés dans les champs. De cette manière, les nutriments contenus dans les engrais minéraux deviennent partie intégrante du cycle de nutriments entre le sol, les cultures et le bétail.

Pour utiliser les engrais de façon durable, les pratiques de gestion doivent viser l'optimisation de la quantité de nutriments qui sont absorbés par la culture et minimiser la quantité de nutriments que le sol perd. La proportion de nutriments absorbés et utilisés pour produire des grains fait référence à l'efficacité agronomique (EA). Nous mesurons l'efficacité d'utilisation des engrais en répondant à deux questions que l'agriculteur pourrait poser:

- *Pour chaque kilogramme de nutriment que j'applique, combien est absorbé par la culture?* Les scientifiques appellent cela le taux de recouvrement des nutriments d'un engrais.
- *Quel rendement additionnel obtiendrai-je pour chaque kilogramme additionnel de nutriments absorbé par la culture?* Les scientifiques appellent cela "efficacité d'utilisation interne" de la plante.

Nous utilisons ces deux termes parce que nous voulons comprendre d'abord si les nutriments appliqués ont été absorbés par les cultures et, ensuite au cas où les nutriments ont été absorbés, s'ils ont donné lieu à un accroissement du rendement.

L'efficacité d'utilisation des engrais peut être estimée à partir des résultats des essais soustractifs où le taux d'absorption de chaque nutriment peut être comparé avec des parcelles fertilisées et non fertilisées. Par exemple, pour estimer l'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté, nous comparons l'absorption de N dans une parcelle ayant reçu les engrais N, P et K avec une parcelle où seuls les engrais P et K sont appliqués. Dans les deux parcelles, P et K sont appliquées pour éliminer ces nutriments comme obstacle à l'absorption de N. Il est évident que seuls des engrais simples peuvent être utilisés pour ces expériences.

Pour calculer l'efficacité agronomique, nous devons d'abord estimer la fraction de récupération:

Le taux de recouvrement (TR) des nutriments appliqués, par exemple pour un nutriment X, est estimée comme suit:

$$TR-X = \frac{X_{abs_F} - X_{abs_C}}{X_{appl}}$$

où:

- TR-X est le taux de recouvrement du nutriment appliqué X (absorption de kg de X/kg de X appliqué).
- X_{abs_F} est l'absorption de X par la culture à la récolte quand le nutriment X est appliqué (kg de X absorbé/ha).
- X_{abs_C} est l'absorption de X par la culture à la récolte sans le nutriment X (kg de X absorbé/ha).
- X_{appl} est le taux du nutriment X appliqué (kg de X/ha).

L'**efficacité d'utilisation interne**, par exemple pour le nutriment X, est définie comme suit:

$$EI-X = \frac{Y_F - Y_C}{X_{abs_F} - X_{abs_C}}$$

où:

- EI-X est l'efficacité interne du nutriment X (kg du produit/kg de X absorbé).
- Y_F fait référence au rendement (kg/ha) obtenu avec le nutriment X.
- Y_C fait référence au rendement (kg/ha) obtenu sans le nutriment X.
- X_{abs_F} est l'absorption de X par la culture à la récolte avec le nutriment X (kg de X absorbé/ha).
- X_{abs_C} est l'absorption de X par la culture à la récolte sans le nutriment X (kg de X absorbé/ha).

Nous pouvons alors combiner ces deux termes pour calculer l'**efficacité agronomique** (EA) d'un nutriment donné (EAN), exprimé en kg du produit/kg de X appliqué qui est défini comme suit:

$$EA-X = \frac{Y_F - Y_C}{X_{appl}}$$

où:

- EA-X est l'efficacité agronomique du nutriment X.
- Y_F fait référence au rendement (kg/ha) obtenu avec le nutriment X.
- Y_C fait référence au rendement (kg/ha) obtenu sans le nutriment X.
- X_{appl} est le niveau de nutriment appliqué (kg X/ha).

L'efficacité agronomique peut également être obtenue en multipliant le taux de recouvrement par la capacité d'utilisation interne:

$$EA-X = TR-X \times EI-X$$

L'efficacité d'utilisation de l'engrais par la plupart des cultures et des systèmes d'exploitation agricole est encore très faible. Par exemple, il a été estimé que deux tiers de l'engrais azoté appliqué dans des systèmes rizicoles irrigués ne sont pas absorbés par le riz pour produire la biomasse et jouer leur rôle physiologique, mais qu'ils se perdent plutôt suite au lessivage, à la volatilisation et la dénitrification.

Améliorer l'efficacité agronomique offre des bénéfices économiques directs et indirects:

- Un plus grand accroissement des rendements peut être réalisé pour une quantité donnée d'engrais appliqué.
- Moins d'engrais est nécessaire pour atteindre un objectif de rendement donné.

Exemple pratique

L'efficacité d'utilisation de l'engrais dépend, dans une large mesure, des conditions de la fertilité du sol. Lorsque deux agriculteurs dont les champs présentent des niveaux différents de fertilité du sol appliquent 50 kg de N/ha avec une gestion similaire, les rendements augmentent et l'efficacité d'utilisation de l'engrais peut varier comme suit:

Agriculteur 1

Historique du champ: dégradé, cultivé pendant plusieurs années sans apport d'engrais ou de fumier.

Rendement sans application de N: 400 kg/ha

Rendement avec application de 50 kg de N/ha: 900 kg/ha

Efficacité agronomique d'utilisation de N = $(900 - 400) \div 50$

= 10 kg de grains/kg de N

Agriculteur 2

Historique du champ: fertile mais déficient en N, ayant reçu des quantités modérées de fumier dans le passé.

Rendement sans application de N: 2000 kg/ha

Rendement avec application de 50 kg de N/ha: 4500 kg/ha

Efficacité agronomique d'utilisation de N = $(4500 - 2000) \div 50$

= 50 kg de grains/kg de N

Interprétation

Il est évident que l'Agriculteur 2 réalise un bien meilleur retour sur son investissement dans l'engrais minéral par rapport à l'Agriculteur 1. Il est important de noter que l'efficacité agronomique d'un nutriment comme l'azote est influencée par plusieurs facteurs autres que l'application de l'engrais azoté. Pour accroître l'efficacité des engrais minéraux, il est essentiel d'adopter, autant que possible, une approche intégrée de gestion des cultures, afin de gérer tous les facteurs limitant ou ralentissant la croissance. Dans les deux exemples ci-dessus, l'efficacité agronomique de l'azote pourrait être augmentée en appliquant d'autres nutriments, tels que les engrais à base de phosphore et de potassium.

Grâce à une bonne gestion des cultures, l'efficacité des engrais minéraux peut être davantage améliorée en utilisant les techniques adéquates d'application d'engrais. Ces techniques sont souvent appelées les '4R' de l'utilisation d'engrais.

4.5 Les '4R' de l'utilisation efficace des engrais

Les quatre meilleures pratiques de la gestion, couramment appelées les 4R ou les quatre "bon" (R pour right en anglais, c'est-à-dire "bon") de la gestion des engrais sont d'appliquer la bonne source de nutriment, au bon taux, au bon moment et au bon endroit pour satisfaire les besoins de la culture. Ces 4R aident à améliorer le taux de recouvrement de l'engrais et ainsi contribuer à l'amélioration de l'efficacité agronomique.

4.5.1 Le bon engrais

Le bon engrais veut dire établir une bonne adéquation entre la source de l'engrais et l'engrais d'une part, et les besoins de la culture et les propriétés du sol d'autre part.

- L'engrais peut être appliqué comme un engrais simple qui fournit un seul nutriment ou un engrais compacté ou de mélange qui fournissent plus d'un élément nutritif. Comme mentionné ci-dessus, les engrais composés apportent plusieurs nutriments dans un seul et même produit et sont donc plus pratiques pour l'agriculteur par rapport à l'utilisation d'engrais simples. Toutefois, ils sont souvent plus coûteux et ne doivent être utilisés que s'ils présentent un meilleur rapport coût/efficacité que les engrais simples. En fin de compte, le choix de l'agriculteur sera influencé par la disponibilité locale des engrais.
- Il est important d'être conscient de l'interaction entre les nutriments. Par exemple, l'application des engrais à base de P et de K peut être nécessaire afin de parvenir à une réponse totale aux engrais azotés. Ce que l'on appelle la "fertilisation équilibrée" est donc un aspect important de l'accroissement de l'efficacité d'utilisation des engrais.
- Le choix de l'engrais dépendra de la culture en question, l'utilisation actuelle et passée de fumier, ainsi que des propriétés du sol et des conditions climatiques. Par ex: là où les sols ont une faible capacité tampon (par exemple les sols sableux), il ne serait pas judicieux d'utiliser le sulfate d'ammonium comme source de N en raison de son potentiel d'acidification du sol, tandis que dans les régions à très fortes précipitations pendant la saison de culture, il est préférable d'éviter les engrais à base de nitrate, parce qu'ils sont plus enclins au lessivage que les engrais à base d'ammonium, tels que l'urée.

- Plusieurs méthodes sont utilisées pour identifier les éléments nutritifs qui sont déficients dans le sol. Elles comprennent l'analyse des sols, les essais soustractifs et les symptômes de carence en nutriments observés sur les cultures.
- Même si certains éléments nutritifs sont en quantités suffisance sur le court terme, il peut être utile d'en appliquer
- une petite quantité pour éviter l'appauvrissement des stocks du sol qui conduit à l'épuisement sur le long terme. Certains sols sont dotés de grandes réserves de nutriments qui peuvent être exploitées pendant de nombreuses années sans effets négatifs. L'analyse des sols et les parcelles en essais soustractifs sont nécessaires pour déterminer s'il y a des stocks suffisants de certains nutriments pour permettre la production de cultures sans application d'engrais.
- Tous les engrais disponibles sur le marché ne sont pas de bonne qualité. Si un agriculteur achète et utilise un engrais frelaté ou de mauvaise qualité, il n'y aura pas l'augmentation de rendement attendue, car il ne contient pas les quantités correctes de nutriments nécessaires. Pour les engrais entièrement solubles comme l'urée, le sulfate d'ammonium, le nitrate d'ammonium, le chlorure de potassium (KCl), le triple super phosphate (TSP) et le phosphate diammonique (DAP), les agriculteurs peuvent vérifier si l'engrais a été frelaté avec du sable ou de la poussière de brique en ajoutant 100 g d'engrais dans 1 litre d'eau. Les engrais non frelatés se dissolvent dans l'eau, entraînent une diminution de la température de l'eau et ne laissent qu'un très petit résidu non dissous.

4.5.2 La bonne dose d'engrais

Lignes directrices générales

La bonne dose d'engrais signifie de faire correspondre la quantité d'engrais appliquée aux besoins des cultures.

- Les doses d'engrais sont spécifiques au site et au système d'exploitation agricole et sont estimées après examen:
 - des besoins en nutriments de la culture;
 - de la capacité du sol à fournir les nutriments (mesurée par l'analyse du sol et les essais soustractifs);
 - de la quantité de nutriments appliquée par les résidus de cultures et le fumier de ferme;
 - de la quantité de nutriments appliquée aux cultures précédentes;
 - du rendement ciblé;
 - du rendement réalisable sous les conditions climatiques locales; et
 - du coût des engrais et de la valeur des produits agricoles.
- L'application d'une trop grande quantité d'engrais cause le gaspillage des éléments nutritifs non utilisés par la culture et une possible contamination de l'environnement. En revanche, l'application d'une trop petite quantité d'engrais diminue le rendement et la qualité des cultures, et produit moins de résidus de cultures devant protéger et développer les sols ou devant être utilisés comme fourrage.
- Dans de nombreuses régions d'Afrique sub-saharienne, les doses d'application d'engrais vulgarisées pour une localité donnée ne sont plus à jour et visent la maximisation des rendements plutôt que les gains économiques de l'agriculteur. Il est très important d'évaluer les objectifs de l'agriculteur et son attitude par rapport au risque avant de recommander des doses d'application d'engrais.

Réponses aux engrais

Les réponses aux engrais peuvent être classées comme suit:

- Faibles réponses sur des sols fertiles avec de grandes réserves de nutriments (souvent les champs se trouvant près de la maison du paysan – champs de case - où les engrais, les déjections animales et les résidus de cultures ont été appliqués régulièrement dans le passé);

- Très bonnes réponses à l'engrais sur des sols présentant une carence en nutriments, mais une bonne réaction (souvent sur les champs plus éloignés de la maison du paysan où les engrais, le fumier et les résidus de cultures ne sont pas appliqués); et
- Très mauvaises réponses à l'application d'engrais sur des sols dégradés où les engrais doivent être appliqués en combinaison avec de grandes quantités d'intrants organiques (résidus de cultures, déjections animales) afin d'obtenir les réponses satisfaisantes aux engrais minéraux.

Les approches utilisées pour faire face à ces différents types de réponses sont notamment:

- L'application de petites quantités d'engrais et/ou de fumier sur les sols fertiles peut maintenir la fertilité des sols.
- Les agriculteurs moins nantis peuvent investir leurs moyens limités plus efficacement en donnant la priorité à l'utilisation des engrais dans leurs champs qui répondent le mieux et en utilisant des quantités modérées qui permettent de réaliser un important rendement par kilogramme d'engrais appliqué (c'est-à-dire une efficacité agronomique élevée).
- L'application de ressources organiques peut être nécessaire pour réhabiliter des sols non sensibles avant qu'une réponse aux engrais minéraux ne soit obtenue.
- Dans certains sols à faible réponse, l'application de ressources organiques peut ne pas entraîner une réponse aux engrais minéraux et d'autres techniques peuvent être nécessaires (par exemple, labour, application de micronutriments).

Mesures pratiques pour améliorer les doses d'application d'engrais

- L'analyse des sols, les essais soustractifs, les budgets de nutriments, l'analyse des tissus, l'analyse des plantes, le calibrage du matériel d'épandage, le dépistage des ennemis de cultures, l'enregistrement des données et la planification de la gestion des éléments nutritifs sont autant d'outils qui peuvent aider à déterminer la bonne dose d'engrais à appliquer
- Voici quelques mesures concrètes pour aider les agriculteurs à améliorer la dose d'application des engrais:
 - Rassembler toutes les informations disponibles à partir des essais d'engrais, en particulier s'ils ont été effectués sur les champs des agriculteurs de la localité où vous travaillez. Quels sont les nutriments ayant amélioré le rendement? L'engrais a-t-il augmenté les profits de l'exploitation et les rendements? Quelle quantité de chaque nutriment était nécessaire pour obtenir des augmentations économiques du rendement?
 - Ces informations peuvent ne pas être disponibles, mais, même si elles sont disponibles, il faut les compléter en trouvant la quantité et le type d'engrais que les agriculteurs utilisent actuellement et quelle réponse en terme d'augmentation de rendement a été obtenue. Établir un tableau indiquant, pour chaque agriculteur, la quantité de nutriments appliquée, l'historique des champs (c'est-à-dire si les engrais ont été appliqués de façon régulière au cours des saisons agricoles passées) et le rendement obtenu.
 - Tous les agents de terrain devraient consacrer autant de temps que possible à visiter les champs, à la recherche de signes de symptômes de déficience en nutriments dans les cultures, rabougrissement et retard de croissance des cultures (souvent dus à la carence en P).
 - Identifier les agriculteurs qui obtiennent des rendements et des profits élevés. Trouver les quantités d'engrais qu'ils utilisent et les rendements qu'ils obtiennent. Recenser toutes les pratiques de gestion de la fertilité du sol qu'ils utilisent qui pourraient être applicables à d'autres agriculteurs.
 - Si possible, effectuer l'échantillonnage et l'analyse des sols pour évaluer leur fertilité, notamment la quantité de phosphore disponible et le potassium et le magnésium échangeables.
 - Travailler avec les agriculteurs afin de tester les recommandations d'engrais, en commençant par de faibles doses d'application.
 - Enregistrer les résultats de votre travail dans un journal de terrain pour construire une base de connaissances fondées sur des informations fiables relatives à l'utilisation d'engrais et les réponses aux engrais dans votre localité. Après quelques années, il est possible de faire une évaluation du risque d'une mauvaise récolte afin que les agriculteurs puissent être informés des risques économiques de l'application d'engrais.

Techniques pour une application précise

Une mesure étalonnée doit toujours être utilisée pour appliquer l'engrais! Pour appliquer l'engrais uniformément au taux adéquat dans un grand champ, des capsules de bouteilles peuvent être utilisées pour mesurer la quantité d'engrais appliquée à chaque plante. Par exemple, une capsule pleine d'une bouteille de limonade contient environ 6 g d'engrais. Dans un champ de maïs avec une population de plants de 40.000 plantes/ha, une application d'une capsule de bouteille de limonade pleine d'urée/plante est équivalente à 110 kg de N/ha.

4.5.3 Le bon moment pour l'application d'engrais

Le bon moment pour l'épandage d'engrais signifie faire en sorte que les nutriments soient disponibles lorsque les cultures en ont besoin.

- Les nutriments sont utilisés de la manière la plus efficace lorsque leur disponibilité est synchronisée avec les besoins des cultures. L'application d'engrais de fonds est faite au moment du semis ou juste après pour fournir N, P, K et d'autres nutriments nécessaires au début de la croissance des cultures.
- Étant donné que l'engrais azoté est très mobile et qu'il se perd facilement en raison du lessivage, une certaine quantité d'engrais azoté devrait être appliquée comme engrais de couverture (top dressing) lors des étapes clés de développement des cultures, généralement lorsque celles-ci ont une croissance plus rapide.
- L'engrais azoté de couverture peut être appliqué en plusieurs fractions pour améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais. Les doses d'application des engrais de couverture peuvent être ajustées en fonction de la façon dont la culture se développe et le prix attendu de la récolte.
- Les engrais de couverture produisent de bons résultats agronomiques si les cultures se développent bien dans des conditions climatiques favorables et de bons résultats économiques si des prix élevés sont attendus à la récolte. Si les cultures se sont mal développées en raison d'une faible pluviométrie et s'il est prévu que le prix de la récolte sera faible, l'application de l'engrais de couverture peut être annulée et l'engrais mis de côté pour la prochaine saison de culture.
- Le moment de l'application (pré-semis ou applications fractionnées), les technologies de libération contrôlée, les stabilisateurs, les inhibiteurs et le choix de produits sont des exemples de pratiques qui influencent les périodes de disponibilité des nutriments.
- Les diagrammes de couleurs des feuilles ou chlorophylle-mètres sont disponibles sur le marché pour guider l'application de N basée sur les besoins des cultures.
- Les engrais azotés à libération lente et leur placement profond améliorent l'adéquation entre la libération des nutriments et les besoins de la culture (parfois appelé synchronie).
- Des tables sont également disponibles pour guider la prise de décision quant au moment de l'application des engrais.

4.5.4 La bonne méthode d'application de l'engrais de fonds

La bonne méthode d'application de l'engrais signifie l'application de l'engrais là où la culture peut accéder aux éléments nutritifs contenus dans l'engrais. Le choix de la méthode d'application par l'agriculteur dépendra de la main-d'œuvre requise.

- Les méthodes d'application devraient être sélectionnées en fonction de la culture en question ou du système de culture et des propriétés du sol. Il est généralement préférable d'incorporer l'engrais de fonds dans le sol pendant ou avant la mise en place de la culture afin d'obtenir une bonne utilisation des engrais.
- Il existe quatre principales méthodes d'application de l'engrais:
 - **L'épandage à la volée.** Les engrais sont appliqués de manière uniforme à la surface du sol. Cela se fait soit avant le semis ou lorsque la culture est en place. Cette méthode est facile à mettre en œuvre et requiert moins de main-d'œuvre. Les engrais azotés de couverture sont généralement épandus dans les champs de riz irrigués.

- **L'épandage d'engrais en bandes.** Les engrais sont placés dans une bande à une profondeur de 5 à 8 cm sous la surface du sol et couverts par le sol. Les semences sont plantées au-dessus du couvert d'engrais. L'épandage d'engrais en bandes est la méthode la plus courante d'application des engrais de fonds.
- **Application localisée.** Les engrais sont appliqués en petites quantités, soit au moment du semis dans chaque poquet avec la semence, soit près de chaque plante pendant la phase de croissance. L'application localisée est préférée là où les plantes sont très espacées et où le sol et les conditions climatiques augmentent le risque de perte d'éléments nutritifs à cause du lessivage. L'application localisée est en train de devenir très populaire chez les agriculteurs, car elle présente un meilleur rapport coût-efficacité que l'épandage.
- **Le placement profond.** Les engrais azotés à libération lente sont placés dans le sol des champs inondés.
- Le labour de conservation, la création de bandes tampons de végétation non agricole autour des cultures vivrières et la gestion de l'irrigation sont des mesures qui aideront à conserver les nutriments des engrais là où ils ont été placés et les rendre accessibles aux cultures en croissance.

4.5.5 Un cinquième 'bon' pour l'utilisation des engrais en Afrique sub-saharienne - Cibler les options les plus porteuses

Étant donné que les agriculteurs d'Afrique sub-saharienne disposent souvent de ressources financières limitées et que généralement ils achètent de petites quantités d'engrais, il est important d'identifier la partie du système d'exploitation agricole où les intrants apporteront le meilleur rendement. Lorsqu'ils sont utilisés de cette façon, les engrais deviennent la clé pour la valorisation du potentiel d'une exploitation. Telle qu'évoquée plus haut, la fertilité des sols varie d'un champ à un autre au sein d'une même exploitation. Il est donc important de savoir quels champs donneront le plus grand rendement par rapport à l'utilisation de l'engrais.

Un deuxième point est d'examiner le système de culture plutôt qu'une seule culture lors de la planification de l'utilisation des engrais. Par exemple, dans le cas d'une rotation maïs-légumineuses à grains, les engrais (en particulier N) appliqués au maïs vont fournir un avantage résiduel en termes d'apport d'éléments nutritifs à la légumineuse suivante, qui peut donc ne pas avoir besoin d'être fertilisée.

Les engrais devraient être fournis à la principale culture dans des systèmes de cultures associées. Dans un champ où le maïs et les haricots sont intercalés, par exemple, l'engrais azoté doit être appliqué au maïs, car les haricots sont en mesure de subvenir à leurs propres besoins en N par fixation biologique de l'azote.

“Le cinquième R” est donc de considérer le “coût d'opportunité” de l'engrais et de s'assurer que les maigres ressources sont utilisées dans la partie du système de culture qui offre le maximum de retombées économiques à l'agriculteur.

4.6 Utilisation des engrais et l'environnement

L'intensification de la production vivrière en utilisant la GIFS fournit les moyens d'accroître la productivité des terres cultivées existantes et contribue ainsi à réduire la nécessité d'étendre les superficies cultivées pour répondre aux besoins actuels et futurs en denrées alimentaires, en fibres et en carburant. L'intensification des cultures peut donc contribuer indirectement aux efforts de conservation de l'environnement en épargnant les terres vierges de la culture.

Il faut prendre garde, toutefois, pour éviter les effets néfastes qui accompagnent l'utilisation excessive des engrais. Dans certains cas, l'excès d'engrais minéraux utilisés dans les pays industrialisés a entraîné le lessivage de l'azote et du phosphore vers les masses d'eau, provoquant la contamination de l'eau et l'eutrophisation. Ces effets néfastes peuvent être évités en appliquant les meilleures pratiques de gestion des engrais, qui permettent d'utiliser les engrais efficacement. Une utilisation excessive d'engrais minéraux n'est pas une préoccupation majeure en Afrique sub-saharienne. Les cas où on assiste à l'eutrophisation en Afrique sont généralement liés aux effluents de villes ou aux pratiques d'agriculture intensive, telles que l'agriculture péri-urbaine et les entreprises horticoles. Au contraire, le plus important problème environnemental en Afrique sub-saharienne est lié à l'épuisement de la fertilité des sols et à leur dégradation, en raison de l'insuffisante utilisation des engrais minéraux et des intrants organiques.

La bonne utilisation des engrais minéraux agit comme un catalyseur pour accroître la productivité générale des sols en Afrique sub-saharienne. Elle contribue à accroître la production générale de biomasse, dont une partie fournit les produits nécessaires pour la vie humaine. Mais en augmentant le rendement de la biomasse, une plus grande quantité de résidus de cultures et autres sous-produits organiques s'accumulent et fournissent les matériaux de reconstitution de la matière organique du sol. En outre, une plus grande quantité de fourrage est disponible pour le bétail.

4.6.1 Utilisation d'engrais et durabilité environnementale

Améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais est la clé de la durabilité environnementale. Les engrais fabriqués sont des ressources non renouvelables étant donné que les engrais azotés sont fabriqués en utilisant du gaz naturel comme source d'énergie pour transformer l'azote atmosphérique en ammoniac, matière première pour la fabrication d'engrais azotés. Environ 3 à 5% du gaz naturel utilisé, soit 1 à 2% de l'approvisionnement énergétique mondial, sont utilisés pour fabriquer les engrais azotés.

Les réserves de matières premières pour la fabrication d'engrais phosphatés et potassiques ne sont pas inépuisables. En vertu de la base d'approvisionnement actuellement identifiée, les réserves de potasse sont encore suffisantes pour au moins 250 ans, tandis que celles de phosphate sont suffisantes pour 300 à 400 ans.

4.7 Minimiser les pertes d'apports nutritifs ajoutés

Un des principaux objectifs de la gestion des engrais consiste à mettre en œuvre des pratiques de gestion aptes à minimiser les pertes en nutriments ajoutés au système de culture. Avec de bonnes pratiques de gestion, une portion significative d'éléments nutritifs apportés au système d'exploitation agricole sous forme d'engrais minéraux ou de résidus de cultures et de fumier peut être recyclée plusieurs fois à travers les cultures et le bétail.

Les éléments nutritifs consommés par les cultures sont exportés sous forme de produits de récolte (grains, tubercules), mais une large partie d'éléments nutritifs consommés par les plantes peuvent être recyclés en les ramenant au sol sous forme de résidus de récolte. Mais, les résidus de récolte peuvent être aussi utilisés comme fourrage pour le bétail et le fumier qui en résulte peut être recyclé en l'épandant dans le champ. Avec une bonne gestion, les éléments nutritifs épandus dans le champ consolident le stock ou le capital de nutriments au champ et valorisent la terre.

L'azote est le plus susceptible aux pertes car il est très mobile et peut se perdre par lessivage et volatilisation. Il existe trois formes de 'capital' d'azote dans le sol:

- l'azote minéral (ammonium NH_4^+ et nitrate NO_3^-);
- l'azote dans la matière organique du sol; et
- l'azote dans une forme plus stable de la matière organique du sol.

NH_4^+ peut être considéré comme un cation échangeable ou piégé entre des couches de minéraux argileux 2/1, tels que la montmorillonite, la vermiculite et l'illite. Dans des conditions aérobies (c'est-à-dire, des sols bien drainés) les bactéries nitrifiantes transforment rapidement NH_4^+ en NO_3^- (nitrification). L'azote est très mobile et se perd facilement par lessivage ou par dénitrification (NO_3^- est transformé en gaz NO , N_2O et N_2). Des pertes substantielles de NH_4^+ peuvent également être occasionnées par la volatilisation (pertes gazeuses sous forme de NH_3), en particulier dans des sols alcalins et quand l'urée est appliquée à la surface du sol.

4.7.1 Erosion hydrique et éolienne

L'érosion hydrique et l'érosion éolienne constituent un facteur majeur qui contribue à la perte des nutriments. Des études récentes indiquent que les pertes annuelles dues à l'érosion au sein des systèmes de production à faible intensité d'intrants en Afrique subsaharienne sont d'environ 10 kg N/ha, 2 kg P/ha et 6 kg K/ha. Il se pourrait que les pertes soient plus

importantes au sein de systèmes à haute intensité d'intrants, ou dans des systèmes où la pluviométrie est élevée. Des barrières contre le ruissellement de l'eau telles que des bandes enherbées ou des cordons pierreux, sont des options efficaces pour réduire l'érosion et maintenir l'engrais et le fumier épandus sur place.

L'érosion et le ruissellement peuvent également être réduits en recouvrant le sol d'un paillage de biomasse vivante ou morte. Le paillage du sol réduit la vitesse de l'eau, évite la formation de la croûte et améliore la porosité du sol et les taux d'infiltration. Même une couche mince de paillage augmente significativement l'infiltration d'eau. En fait, des études ont démontré que l'application de 2 t/ha de paille réduit le ruissellement de 60% et l'érosion de 90%. Avec 6 t/ha de paille, le ruissellement était réduit de 90% et les niveaux d'érosion étaient réduits à zéro. Laisser la paille dans le champ réduit beaucoup aussi la perte de sol due à l'érosion éolienne. Au Niger, 1,4 t/ha de paillage de mil a réduit les pertes dues à l'érosion éolienne de 63%. Le problème auquel la plupart d'agriculteurs fait face est que leur priorité est d'utiliser les matières organiques pour nourrir leur bétail.

Les méthodes de préparation du sol peuvent également s'avérer efficaces pour l'amélioration de l'infiltration et la réduction du ruissellement. La technique dite « Zaï » s'avère efficace pour la résolution du problème d'encroustement en surface: de petits trous sont creusés dans le sol et de petites quantités d'engrais minéraux et /ou organique sont ajoutées. Améliorer le contenu de la matière organique du sol de manière générale réduit la susceptibilité du sol à former des croûtes en surface et améliore la structure du sol et sa capacité de rétention d'eau.

4.7.2 Lessivage

Il y a lessivage d'éléments nutritifs quand l'eau transportant les nutriments percole au-delà de l'accès des racines des plantes dans le profil du sol et les nutriments sont ainsi perdus pour les plantes. Le lessivage est un problème particulier aux régions à forte pluviosité (>30mm/jour) et aux sols sablonneux à grains grossiers (>35% de sable). Le lessivage concerne principalement les minéraux d'azote (particulièrement le nitrate NO_3^-) et des bases échangeables (K et Mg) qui sont souvent lessivés avec NO_3^- . Le phosphore n'est généralement pas susceptible au lessivage sauf dans des sols sablonneux à grains très grossiers.

Certaines études affirment que 50–60% d'engrais K épandus dans les plantations de bananes en Côte d'Ivoire sont perdus par lessivage. Réduire les pertes résultant d'une forte évacuation est difficile, mais deux approches peuvent être envisagées:

- Promouvoir le développement des racines par l'application de nutriments et l'amélioration de la structure du sol. Ceci permettra à la plante de mieux profiter de l'eau qui s'est infiltrée dans le sol en dessous de la profondeur actuelle de la racine, et ainsi la perte de nutriments sera réduite
- Association de cultures annuelles et d'arbres, les arbres peuvent "pomper" l'eau et les éléments nutritifs à partir des profondeurs en dessous du niveau des racines des plantes annuelles, permettant une meilleure utilisation de l'eau et des éléments nutritifs.

4.7.3 Pertes gazeuses par dénitrification et volatilisation

Sous des conditions anaérobies (par exemple, un champ ou une rizière mal drainée), le nitrate est réduit au N_2O et N_2 (dénitrification). La dénitrification se produit également sur des sols aérobie lors de la présence de niches anaérobies créées suite à l'application de ressources organiques décomposables. La meilleure façon de réduire la dénitrification dans les champs en hautes terres consiste à améliorer le drainage du sol et à maintenir une bonne structure du sol, afin d'éviter des conditions de croissance anaérobiques.

L'azote peut également être perdu par volatilisation, car les pertes de NH_3 par volatilisation sont considérables en sols alcalins (pH du sol élevé). Jusqu'à 60% de N épandu sous forme d'urée sur le riz paddy (c'est-à-dire dans des rizières inondées) peuvent se perdre par volatilisation. On peut réduire les pertes par un placement en profondeur des engrais par incorporation manuelle.

L'azote se perd par volatilisation du NH_3 pendant le stockage et le traitement du fumier. On peut réduire les pertes en utilisant des fosses de stockage anaérobiques avec ou sans ajout de résidus de récolte.

4.7.4 Gestion des résidus de cultures

Les cultivateurs utilisent les résidus de cultures de plusieurs manières. Ils peuvent être:

- retournés aux champs pour servir de paillis et recycler les éléments nutritifs;
- utilisés comme aliment pour bétail (et le fumier est retourné au champ);
- utilisés comme source de combustibles; ou
- utilisés comme matériaux de construction (par exemple construction de murs ou de toits).

Le choix fait par le cultivateur dépendra de ses propres circonstances. La seule option pour conserver les stocks de matières nutritives consiste à retenir ou à incorporer des résidus dans le champ ou à les utiliser comme fourrage pour le bétail et recycler le fumier ou faire du compost à utiliser dans le système de culture.

Tableau 4.2 Concentrations de N, P et K dans la paille des majeures céréales en Afrique subsaharienne.

Éléments nutritifs	Poids sec (g/kg) ^a					
	Mil	Sorgho	Maïs	Riz	Soja	Arachides
Azote	4–10	4–9	5–8	4–9	8–13	12–20
Phosphore	1–1	0–1	0–1	1–2	1–2	1–3
Potassium	15–27	7–15	7–17	13–27	9–18	8–12

^aCes valeurs ne comprennent pas les feuilles, qui se détachent et restent dans le champ la plupart du temps.

Les résidus de récolte contiennent de petites quantités d'éléments nutritifs (Tableau 4.2) et l'importance du recyclage des cultures est de restaurer la matière organique du sol et de fournir du paillis. Le recyclage des résidus de récolte grâce au compostage ou en nourrissant le bétail améliore la disponibilité des nutriments

4.8 Utilisation de germoplasme amélioré

Un germoplasme fait référence aux semences, jeunes plants et autres matériaux de plantation qui ont été préparés pour répondre aux conditions spécifiques de l'environnement dans lequel ils seront cultivés. Bien que presque tous les germoplasmes améliorés produisent de meilleurs rendements que les variétés « locales », le rendement n'est pas la seule considération, particulièrement quand les semences sont semées dans un environnement rude qu'on retrouve dans de nombreuses régions d'Afrique subsaharienne. Une gestion améliorée de la fertilité du sol est généralement requise pour tirer parti au maximum de l'investissement dans les variétés améliorées. Nous allons maintenant analyser les caractéristiques d'un germoplasme amélioré.

4.8.1 Potentiel de rendement génétique

Une importante caractéristique du germoplasme amélioré est son potentiel de rendement génétique lorsqu'il est planté dans l'environnement biophysique cible. Les variétés améliorées sont souvent produites de manière à répondre à des conditions environnementales spécifiques (par exemple, température, humidité, acidité du sol) qu'on retrouve dans les champs cibles des agriculteurs. Dans la majorité des germoplasmes améliorés, la proportion de la biomasse totale convertie en portion récoltée (par exemple, grains, tubercules), qu'on appelle indice de récolte, est plus élevée que pour les variétés locales.

Au cours des 10 dernières années, des germoplasmes améliorés ont été produits avec des caractéristiques supplémentaires telles que:

- le riz doté d'une teneur élevée en vitamine A;
- le maïs contenant des protéines de haute qualité;

- la patate à amidon jaune riche en vitamine A; et
- le riz résistant aux inondations.

Les sélectionneurs bien souvent produisent un matériel végétal adapté ou tolérant aux aléas d'un environnement donné, comme la toxicité en aluminium et les basses températures qu'on rencontre en haute altitude, ou la sécheresse.

4.8.2 Résistance aux ravageurs et maladies

Les ravageurs et les maladies contribuent à la mauvaise santé des plantes et provoquent des pertes de cultures ou des mauvaises récoltes. Les plantes malades ne sont pas capables de tirer les nutriments du sol de manière effective. Par conséquent, les cultures affectées par les ravageurs et les maladies conduisent à l'usage inefficace et au gaspillage d'engrais et autres intrants. La résistance aux ravageurs et aux maladies est souvent incorporée dans les variétés modernes en plus des caractéristiques de rendement élevé, mais il importe de se rappeler que la santé des plantes et leur résistance aux ravageurs et aux maladies s'améliorent grâce à l'apport de nutriments adéquats.

Certains matériaux génétiques sont simplement indemnes de maladies comme les boutures de manioc sans virus et les jeunes bananiers sains, les deux étant produits par culture de tissus. Il existe également des organismes génétiquement modifiés (OGM), tels que le coton OGM doté d'une résistance aux ravageurs, qui ont été adoptés en Afrique subsaharienne.

4.8.3 Efficacité d'utilisation des nutriments

Etant donné que les variétés améliorées ont généralement un indice de récolte plus élevée, elles présentent aussi une efficacité agronomique plus élevée que les « variétés locales ».

Certaines variétés améliorées ont des réseaux racinaires plus étendus ou plus profonds qui permettent aux plantes de récupérer des éléments nutritifs à partir d'un plus grand volume du sol par rapport aux variétés locales.

4.8.4 Disponibilité et qualité des plants

Les agriculteurs doivent être en mesure d'acheter des variétés améliorées, soit sur le marché auprès des agro-distributeurs ou d'autres réseaux de distribution d'intrants, ou à travers des initiatives de multiplication de semences communautaires locales. La continuité de la distribution est clairement très importante. Il est essentiel que la qualité des matériaux offerts aux paysans soit conforme aux normes minimales:

- de pureté (par exemple, semence, bouture ou jeune plant conformes au type homologué);
- soient indemnes de maladies et de ravageurs;
- soient de taille uniforme; et
- aient une viabilité élevée (mesurée comme taux de germination pour les semences).

4.8.5 Trouver et sélectionner des germoplasmes améliorés pour leur utilisation dans la GIFS

Il est important d'avoir des informations concernant les variétés améliorées qui existent actuellement dans la région, où elles peuvent être achetées et à quel prix. Il est également essentiel d'analyser les systèmes communautaires de production de semences existants, car des variétés améliorées pour certaines cultures, les légumineuses en particulier, pourraient ne pas être disponibles sur le marché.

Avant leur introduction, les nouvelles variétés devraient être soigneusement testées dans l'environnement où elles sont destinées à être utilisées. L'analyse de nouvelles variétés devrait porter sur la croissance végétative, la résistance aux ravageurs et maladies, la tolérance à la sécheresse, les propriétés post-récolte de consommation et de stockage, ainsi que le rendement.

4.9 Exploiter les avantages des légumineuses fixatrices d'azote

Bien que beaucoup de cultures manquent d'azote quand elles sont cultivées dans des sols pauvres, elles sont entourées d'air composé à 79% d'azote (N_2). Les légumineuses ont développé la capacité de capter le N_2 de l'atmosphère en formant des nodules avec des bactéries du sol appelées rhizobiums. La légumineuse fournit aux rhizobiums de l'énergie sous forme de carbone obtenu par photosynthèse, et en contrepartie les rhizobiums fixent le gaz N_2 en azote combiné libéré ensuite dans le nodule de la racine et utilisé par la plante pour sa croissance.

Les feuilles et semences de légumineuses sont riches en azote protéique, ce qui explique pourquoi elles sont importantes en agriculture. Les légumineuses sont largement utilisées pour:

- **la nourriture.** Il s'agit de légumineuses à grains telles que les petit pois (*Pisum sativum*), le haricot commun (*Phaseolus vulgaris*), le niébé (*Vigna unguiculata*) et le pois d'Angole (*Cajanus cajan*). Les graines d'arachides (*Arachis hypogaea*) et de soja (*Glycine max*) sont riches en protéines et en huile.
- **le fourrage.** Le feuillage de nombreuses légumineuses herbacées (par exemple, *Stylosanthes guianensis*, *Desmodium uncinatum*) et les arbustes (par exemple, *Calliandra calothyrsus*, *Gliricidia sepium*) forment un excellent fourrage pour le bétail.
- **le bois de chauffage et les piquets.** Beaucoup de légumineuses arborescentes à croissance rapide sont utiles comme bois de chauffage, clôture et piquets, etc (par exemple, *G. sepium*, *Acacia* spp.)
- **la fertilité.** Toutes les légumineuses mentionnées ci-dessus peuvent potentiellement améliorer la fertilité du sol, mais celles qui présentent le plus d'intérêts sont les légumineuses utilisées engrais vert (par exemple, *Mucuna pruriens*, *Calopogonium mucunoides*), les légumineuses à graines et les arbustes ou arbres à croissance rapide (par exemple, *G. sepium*, *Sesbania sesban*) quand ils sont cultivés en rotation avec d'autres cultures ou comme cultures intercalaires pour améliorer la fertilité du sol (voir encadré 4.1).

Certaines des légumineuses les plus utiles ont de nombreuses utilisations, et sont appelées légumineuses à usages multiples.

Encadré 4.1 Avantages et coûts des engrais verts et des légumineuses arborescentes.

Malgré les recherches approfondies et les projets de développement qui ont encouragé l'utilisation d'engrais verts et de légumineuses arborescentes (qu'on appelle "arbres fertilisants") pour améliorer la fertilité des sols en Afrique subsaharienne, le taux d'adoption a été décevant. L'investissement nécessaire pour préparer la terre, semer, lutter contre les mauvaises herbes et labourer sous un engrais vert ou une légumineuse arborescente est considérable, en particulier compte tenu du fait que l'avantage de rendement accru est uniquement réalisé à la fin de la croissance de la culture suivante, parfois plus d'une année plus tard.

En règle générale, une légumineuse utilisée comme engrais vert devrait produire au moins 2 t/ha de matière sèche ou environ 50–60 kg N/ha - ce qui pourrait donner un supplément de 1 t/ha de céréales lors de la récolte suivante de céréales, afin que le risque de perte de productivité des terres soit pris en compte. Même dans ce cas, cela ne suffira peut-être pas pour rembourser l'investissement supplémentaire requis en main-d'œuvre.

Bien qu'il ait été affirmé que des centaines de milliers d'agriculteurs utilisent des arbres fertilisants, ces arbres ont disparu des systèmes d'exploitation agricole où ils avaient fait l'objet de promotion deux ans après que les projets aient pris fin. La plantation par les agriculteurs des arbres à jachère améliorée s'est depuis lors avérée être une pseudo-adoption, les agriculteurs produisant effectivement des semences de légumineuses pour un marché lucratif des ONG et instituts de recherche. Il ne s'agit pas d'un cas isolé. Il existe de nombreux exemples d'engrais verts et de légumineuses destinés à l'amélioration de la fertilité des sols, qui ont précédé l'exemple de l'ICRAF, où des tendances similaires d'expansion rapide ont été observées, les semences de légumineuses connaissant une forte demande pendant la durée des projets, suivie par un abandon total après la fin du projet.

à suivre

Encadré 4.1 Suite

Les évaluations participatives des technologies à base de légumineuses pour l'amélioration de la fertilité des sols menées auprès des petits exploitants au Ghana, au Kenya, en Ouganda et au Zimbabwe montrent que les agriculteurs accordent plus de valeur aux légumineuses qui leur donnent des avantages directs en termes de nourriture, revenus ou fourrage pour animaux. Les avantages des légumineuses en termes d'amélioration de la fertilité des sols sont reconnus, mais considérés comme d'importance secondaire.

Il existe peut-être des créneaux où les engrais verts et les légumineuses arborescentes destinés à améliorer la fertilité des sols sont adoptés et utilisés par les agriculteurs. Il y a des exemples où les engrais verts ont connu une diffusion spontanée dans les petites exploitations agricoles dans les pays tropicaux où ils ont permis de faire des économies de main-d'œuvre grâce à la suppression de mauvaises herbes pernicieuses. Ces créneaux doivent être identifiés de manière véritablement participative en tenant compte des réactions des agriculteurs et en les comparant avec d'autres approches d'amélioration de la fertilité des sols.

4.9.1 Composantes d'une symbiose fixatrice d'azote

Une bonne fixation de l'azote par les légumineuses (Encadré 4. 2) dans le champ dépend de l'interaction:

$$(G_l \times G_r) \times E \times G$$

où:

- G_l représente le génotype de la légumineuse (l'espèce cultivée).
- G_r représente les souches de rhizobiums trouvées dans le sol ou utilisées pour l'inoculation du génotype de la légumineuse
- E représente l'environnement, c'est-à-dire le climat (température, pluviométrie, longueur du jour, etc. pour englober la longueur de la saison de croissance) et les sols (acidité, toxicité en aluminium, éléments nutritifs limitants, etc.)
- G représente la gestion, c'est-à-dire les aspects de la gestion agronomique (utilisation d'engrais minéraux, inoculation, dates de semis, densité des plants, désherbage).

La mise en place d'une fixation effective de l'azote dépend de l'optimisation simultanée de toutes ces composantes.

Les légumineuses sont souvent cultivées par les femmes pour la consommation domestique. Elles sont souvent cultivées dans des sols plus pauvres avec peu d'engrais ou de fumier, et moins de soins en termes de travail pour la gestion des cultures. Par conséquent E et G souvent l'emportent sur le potentiel de la symbiose légumineuse-rhizobiums pour la fixation de N_2 . Dans de pareilles circonstances, il faut chercher des possibilités d'inclure les légumineuses en rotation avec d'autres cultures comme des céréales qui reçoivent des engrais, afin que les légumineuses puissent bénéficier d'éléments nutritifs résiduels du sol. S'il existe un marché pour des légumineuses à graines, l'usage direct d'engrais de fond sur les légumineuses pourrait s'avérer approprié et nécessaire pour obtenir un bon rendement. L'élément nutritif dont les légumineuses ont le plus besoin est le phosphore, mais on observe des déficiences de plus en plus fréquentes en potassium et autres nutriments dans les champs.

4.9.2 Nécessité d'inoculation avec des rhizobiums

Les légumineuses varient considérablement par rapport à leur capacité à former des nodules sur les racines avec les rhizobiums "indigènes", c'est-à-dire les rhizobiums compatibles qu'on trouve communément dans le sol où les légumineuses sont plantées.

- Le soja (*G. max*) et le pois chiche (*Cicer arietinum*) forment des nodules avec un nombre restreint de souches ou espèces de rhizobiums et sont par conséquent considérés comme "spécifiques" dans leurs besoins en rhizobiums.

- Le niébé (*V. unguiculata*) est considérée comme la plus polyvalente (non-exigeante ou qui forme des nodules naturellement) des légumineuses à graines, et nodule avec une large gamme de rhizobiums qu'on trouve dans plusieurs types de sols.

Il existe dans la nature une grande variété de versatilité et de spécificité, mais la caractéristique la plus courante des légumineuses est la versatilité de nodulation avec des souches indigènes du sol. Ainsi les légumineuses à graines comme le niébé ou l'arachide, ainsi qu'une vaste majorité de fourrages, d'engrais vert et de légumineuses arborescentes, n'ont pas besoin d'être inoculés avec les rhizobiums.

Les légumineuses qui ont des exigences spécifiques en rhizobiums, particulièrement le soja et le pois chiche, ont besoin d'inoculation. Les inocula de rhizobium sont appliqués sur les semences au moment du semis (voir <http://www.n2africa.org/N2media> pour une série de vidéos instructives sur la fabrication et l'usage d'inoculants).

La plupart des inocula de rhizobium sont utilisés sur le soja, et sur les sols pauvres ils peuvent faire la différence entre une bonne récolte et une mauvaise récolte. La majorité des variétés de soja sont spécifiques dans leurs besoins en rhizobium et nécessitent d'être inoculées pour produire de bons rendements. Des variétés plus récentes (et certaines anciennes variétés) de soja sont versatiles dans leur nodulation, mais bien qu'elles puissent former des nodules et fixer l'azote avec des rhizobiums indigènes, l'inoculation souvent augmente encore leur rendement jusqu'à 20%.

Bien que peu de travaux de recherche aient été menés sur l'inoculation du pois chiche en Afrique, les preuves qui existent indiquent que ces cultures répondent bien aux inocula de rhizobium. La situation du haricot ordinaire (*P. vulgaris*) est moins claire, la plupart des résultats expérimentaux indiquent des réponses faibles et très sporadiques aux inocula, bien que certains scientifiques recommandent l'inoculation avec les rhizobiums.

Les légumineuses généralement ont besoin d'inoculation dans les trois situations suivantes:

- quand les rhizobiums compatibles sont absents du sol;
- quand la population de rhizobiums compatibles est faible; et
- quand les rhizobiums indigènes sont moins efficaces dans la fixation de l'azote avec les légumineuses comparativement aux souches d'inoculum sélectionnés.

Bien que l'inoculation puisse améliorer les récoltes lors de la première saison de nouvelles légumineuses dans un endroit où elles n'ont jamais été plantées avant, des rhizobiums compatibles sont souvent présents. Ces rhizobiums se multiplient dans la rhizosphère d'un hôte compatible afin que la population augmente et que les inoculations ne soient plus essentielles lors des saisons suivantes. Si les inocula sont disponibles ils ne coûtent pas aussi chers que les autres intrants de production comme l'engrais, de sorte que l'usage de l'inoculum est préférable aux risques de pertes de rendement.

De nouvelles recherches sur les inocula de haute qualité indiquent que les gains de rendement consécutifs à l'inoculation seraient possibles à long terme, même avec les légumineuses les plus versatiles.

4.9.3 Contribution des légumineuses à la fertilité du sol

La fixation biologique de l'azote peut contribuer jusqu'à 300 kg de N/ha en une saison à partir de légumineuses à graines ou engrais vert et de façon exceptionnelle jusqu'à 600 kg de N/ha en une année à partir de légumineuses arborescentes. Cependant dans des cas où les contraintes comme la sécheresse ou les déficiences en phosphore ou potassium limitent la productivité des légumineuses, les bénéfices provenant de la fixation de l'azote sont également réduits.

La contribution des légumineuses à la fertilité du sol dépend de la quantité d'azote fixé par rapport à la quantité d'azote retiré du champ au moment de la récolte. Les légumineuses cultivées pour l'amélioration de la fertilité du sol, telles que les engrais verts ou les arbres agro-forestiers, apportent la plus grande quantité d'azote, car très peu est retiré du champ (voir encadré 4.2). Il y a de grandes différences entre légumineuses à graines en termes de quantité d'azote restitué au sol. En général, plus la biomasse produite est grande, plus les quantités d'azote provenant de la fixation sont élevées; ainsi les variétés à usage multiple du soja, ou les variétés rampantes d'arachide et de niébé laissent derrière le plus d'azote.

Encadré 4.2 Nodulation dans la famille des légumineuses (*leguminosae*)

La famille des *leguminosae* contient environ 19 000 espèces qui sont classées en trois sous-familles: les *caesalpinioideae*, les *mimosoideae* et les *papilionoideae*. La sous-famille des *caesalpinioideae* est considérée comme la plus ancienne sous-famille ancestrale ayant engendré les autres sous-familles. La grande majorité des légumineuses *mimosoideae* et *papilionoideae* sont capables de former des nodules sur les racines et de fixer le N_2 , mais seulement un quart des espèces légumineuses *caesalpinioideae* peut former des nodules et fixer le N_2 . Un exemple bien connu de fixation de N_2 par une légumineuse *caesalpinioideae* est la légumineuse fourragère Wynn cassia (*Chamaecrista rotundifolia*). Certaines légumineuses non-nodulantes sont largement cultivées comme plantes ornementales (par exemple, *Bauhinia* spp., *Delonix regia*) ou sont utilisées comme arbres agro-forestiers (par exemple *Senna siamea*, *Senna spectabilis*), du fait de leur croissance rapide et de la production d'ombre et de bois de chauffage. Dans certaines circonstances, les *Senna* spp. se sont avérés adaptés à la réhabilitation des sols dégradés. Au Bénin, le profond enracinement du *S. siamea* lui a permis de récupérer des éléments nutritifs des profondeurs du sol qui n'étaient pas explorées par d'autres légumineuses dans les cas d'un sous-sol relativement riche.

Dans le sud du Malawi, un programme intitulé "vivres contre travail" au début des années 1990, a mené à la vulgarisation et à la recommandation du système de cultures en bandes pour plus de 100.000 agriculteurs. De nombreux agriculteurs ont reçu des plants de *S. spectabilis*. Malheureusement les avantages ont été minimes sur les sols stériles des petits exploitants et les rendements n'étaient pas meilleurs ou étaient même pires que sans arbres. La raison pour laquelle la *Senna* a été promue au Malawi était en grande partie l'insuffisance des semences d'autres légumineuses fixatrices de N_2 telles que la *Gliricidia sepium*. Par conséquent, bien que des légumineuses non-fixatrices de N_2 peuvent parfois être bénéfiques à la fertilité du sol, il est dangereux de supposer que cela est dû aux apports de fixation de N_2 .

Si tous les résidus de légumineuses sont retirés du champ au moment de la récolte, la quantité d'azote restituée au sol pourrait s'avérer minime. Souvent les résidus de légumineuses sont retirés du champ et servent à nourrir le bétail. C'est souvent le cas pour les arachides car toute la plante est arrachée du sol et les gousses sont écosées à la maison.

Des variétés de légumineuses à courte durée comme le soja et le niébé qui sont récoltées quand les gousses sont séchées ont déjà perdu la plupart de leurs feuilles par sénescence et ces feuilles, ainsi que les racines et les nodules restent dans le sol et offrent de l'azote pour les cultures suivantes. Au Sahel, les paysans vendent du foin de niébé comme culture commerciale et, par conséquent, tous les nutriments de la biomasse aérienne se «perdent» du champ; mais l'argent tiré de la vente du foin de niébé pourrait permettre au paysan d'acheter de l'engrais à utiliser pour les autres cultures.

Les rendements du maïs cultivé après les légumineuses à graines peuvent doubler ceux du maïs cultivé d'année en année sur la même parcelle. Certains avantages de la rotation des cultures ne peuvent pas être attribués directement aux apports provenant de la fixation du N_2 mais résultent de la suppression des maladies et ravageurs suite à la rupture de la monoculture continue du maïs.

Beaucoup de légumineuses à graines sont cultivées comme cultures intercalaires avec des céréales, et d'autres possibilités existent telles qu'intercaler les légumineuses au moment de la mise en place de cultures espacées comme le manioc. Quand les légumineuses fixatrices de N_2 sont intercalées, les avantages de ces légumineuses sont la récolte supplémentaire et "l'économie" d'azote pour les céréales, plutôt que l'apport direct de N_2 fixé dans le sol.

4.10 Utilisation d'inoculum à champignons mycorhiziens arbusculaires

Les champignons mycorhiziens arbusculaires sont des organismes bénéfiques qui peuvent être préparés comme produits commerciaux et sont largement utilisés en agriculture. Les cultures réagissent différemment aux mycorhiziens, certaines espèces devenant entièrement dépendantes (obligatoires), partiellement dépendantes (facultatives) ou ne réagissant pas. Des inocula commerciaux sous forme de champignons mycorhiziens à arbuscules existent sur le marché et ont été utilisés pour améliorer la productivité des cultures dans des programmes agricoles, forestiers et de réhabilitation du sol. Les champignons mycorhiziens arbusculaires forment une association efficace avec plus de 80% de cultures économiquement importantes et améliorent l'assimilation de

l'eau et des nutriments, réduisent les dommages causés par les insectes et les maladies, et améliorent la structure du sol. Les propagules mycorhiziennes sont présentes dans tous les types de sols, mais l'inoculation peut être bénéfique quand les populations indigènes sont faibles.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires fonctionnent mieux dans des sols de faible fertilité et notamment dans des sols contenant de petites quantités de phosphore. Les champignons mycorhiziens arbusculaires ne se substituent pas aux engrais et dans des sols à faible quantité de phosphore, l'application d'engrais phosphaté est nécessaire avant qu'une réponse à l'inoculation aux champignons mycorhiziens arbusculaires soit obtenue.

La mobilité du phosphore est faible dans le sol et son apport est rapidement épuisé par les cultures au niveau des racines. Les hyphes des champignons mycorhiziens arbusculaires améliorent l'accès des racines au phosphore et à d'autres nutriments, tels que le zinc, dans le sol au-delà de la zone appauvrie entourant les racines.

Les produits des champignons mycorhiziens arbusculaires fonctionnent mieux dans les conditions suivantes:

- les sols où une grave érosion a entraîné des pertes de la couche superficielle du sol;
- les cultures à faible consommation d'intrants où peu d'engrais minéraux ont été utilisés;
- les cultures plantées après mise en jachère nue où la population de propagules de champignons mycorhiziens arbusculaires est faible à cause de l'absence de plantes hôtes;
- l'utilisation des terres avec des espèces végétales non-mycorhiziennes telles que les brassicacées; et
- les sols non sensibles (c'est-à-dire les sols qui répondent mal à l'épandage d'engrais).

Les caractéristiques des plantes favorables à la mise en place des champignons mycorhiziens à arbuscules:

- les espèces végétales avec des racines peu développées;
- les légumineuses nodulantes ayant une forte demande en P pour la nodulation;
- les variétés de plantes à multiplication végétative (par exemple, tubercules, plantains, bananes, boutures de certaines espèces d'arbres) avec un faible développement racinaire; et
- les plantes cultivées dans des pépinières avant leur mise en place dans les champs.

Les champignons mycorhiziens arbusculaires de haute qualité commerciale sont dotés des propriétés suivantes:

- un nombre élevé de propagules viables et infectieuses (spores, hyphes et fragments de racines infectés) présents dans le produit; et
- la capacité à coloniser l'hôte avec arbuscules et vésicules évidents dans les racines des plantes hôtes.

L'inoculation peut ne pas fournir une réponse si:

- les sols sont fertiles et contiennent une quantité suffisante de phosphore;
- l'hôte n'est pas tributaire des associations de mycorhizes; et
- les sols ont intrinsèquement des propagules riches en champignons mycorhiziens arbusculaires infectieux.

4.11 Autres pratiques de gestion de la fertilité des sols

D'autres mesures sont souvent nécessaires, outre l'utilisation de germoplasme, engrais et intrants organiques appropriés, notamment s'il y a d'autres contraintes relatives à la fertilité des sols qui empêchent une bonne croissance des cultures. Quelques exemples sont donnés ci-dessous, néanmoins cette liste n'est pas nécessairement exhaustive:

- **Correction de l'acidité du sol.** Certains sols sont fortement acides, soit à cause des propriétés inhérentes au sol, soit en raison de pratiques de gestion qui génèrent l'acidité à long-terme (par exemple, l'utilisation à long terme d'engrais au nitrate d'ammonium). L'acidité en elle-même n'est souvent pas le problème majeur, à moins que le pH ne soit très faible (c'est-à-dire < 4) mais les sols acides ont souvent une teneur élevée en Al échangeable qui limite fortement la croissance de certaines cultures (le maïs par exemple). Les taux d'application de la chaux devraient être calculés pour réduire l'Al échangeable (à environ 15%) plutôt que d'augmenter le pH du sol.

- **Déficiences en oligo-éléments.** Les déficiences en certains oligo-éléments peuvent être observées (par exemple, Zn, B). Elles apparaissent souvent pendant la croissance de la plante. Certains mélanges d'engrais comme le "Mavuno" au Kenya contiennent des oligo-éléments.
- **Rupture des croûtes.** La gestion continue sur des sols sujets au tassement peut entraîner la formation sous la surface du sol d'une barrière contre la croissance des racines. Une rupture de telles croûtes par un labour profond ou labour au chisel à une profondeur de 30 cm permet aux racines de pénétrer la croûte et d'accéder à plus d'éléments nutritifs et d'eau, permettant une meilleure croissance des cultures.
- **Collecte d'eau.** Les nutriments ne seront récupérés efficacement que si les cultures ont suffisamment d'eau. Il est possible d'augmenter la quantité de précipitations captées et mises à la disposition des cultures dans des zones sujettes à la sécheresse. La plupart des approches visent à collecter plus d'eau en installant des structures permettant de diminuer le ruissellement (par exemple, le système Zaï utilisé au Sahel ou l'utilisation de bassins d'ensemencement en Afrique australe), ou par le maintien du paillis organique sur la surface du sol pour favoriser l'infiltration et réduire l'évaporation à la surface du sol. Toutes ces pratiques nécessitent des ressources supplémentaires en termes de main-d'œuvre ou de matières organiques. Une évaluation du risque de stress de sécheresse dans une zone particulière permettra de déterminer si le déploiement de ces ressources supplémentaires en vaut la peine.
- **Contrôle de l'érosion.** L'érosion des sols peut être un problème grave, particulièrement sur des champs en pentes raides, mais également sur des champs légèrement en pente avec un sol de surface à texture grossière qui est sujet à l'érosion. La matière organique et les éléments nutritifs du sol sont perdus en sol érodé, ce qui peut réduire sensiblement l'efficacité agronomique des apports d'intrants. Plusieurs mesures peuvent aider à contrôler l'érosion, notamment la plantation de haies vives (par exemple, bandes herbeuses), la construction de terrasses, ou l'application de paillis à la surface du sol.
- **Préparation de la terre.** Une préparation appropriée du lit de semis est une condition préalable pour une bonne mise en place des cultures, particulièrement pour les cultures qui produisent de petites graines. La germination est améliorée (et les besoins en semences peuvent être réduits) lorsque le sol est cultivé pour produire un ameublissement comprenant de petites particules.
- **Date de semis.** Un retard de semis affecte généralement les rendements négativement, en particulier quand la saison de croissance est courte. Le choix de la date de semis devrait être fait en fonction de la connaissance du début de la saison des pluies. Le semis fait à temps est généralement une condition préalable à l'accroissement des rendements.
- **Espacement.** Lorsque les cultures sont plantées ensemble, elles sont en compétition les unes avec les autres pour les nutriments, la lumière et l'eau. Les densités de plantation appropriées, exprimées en nombre de plants par hectare doivent être ajustées en fonction des divers environnements et elles sont souvent réduites dans des conditions sous-optimales de précipitations et de fertilité des sols (Tableau 7.40). Par exemple, lorsque cultivé en monocultures, il est recommandé que le maïs soit semé à environ 50 000 plants/ha alors qu'il est mieux de planter le soja à environ 300 000 plants/ha. Il est également important de considérer la distance entre les lignes de semis, la distance entre les plantes sur une ligne, et le nombre de plantes par poquet.
- **Méthodes de plantation.** La viabilité des semences doit être d'au moins 80% pour atteindre une pleine plantation. Les semences de céréales et les graines de légumineuses devraient être plantées à la profondeur correcte. Planter plus de semences que nécessaire permet d'avoir la meilleure densité de plantation pour compenser l'éclaircie et la germination incomplète. Les boutures de manioc doivent être insérées dans le sol à un angle correct. La taille de la tubercule est importante pour d'autres tubercules (par exemple, igname, pomme de terre, *Solanum tuberosum*).
- **Le sarclage.** Les mauvaises herbes rivalisent avec les cultures pour les éléments nutritifs, l'eau et la lumière, et les retirer en temps opportun a un impact considérable sur le rendement des cultures. Il est également important de sarcler avant l'application de l'engrais de couverture pour que les nutriments appliqués favorisent la croissance des cultures et non celle des mauvaises herbes.
- **Lutte contre les ravageurs et les maladies.** Les ravageurs et les maladies doivent être contrôlés à des stades spécifiques de croissance des cultures. Les semences traitées doivent être utilisées en cas de risque d'attaque

de ravageurs dans le lit de semis. Pour de nombreuses cultures, la lutte contre les ravageurs et les maladies sera requise, généralement entre la floraison et le remplissage de la gousse ou du grain. Faute de quoi, le résultat sera une culture malsaine qui utilisera les nutriments et l'eau de manière inefficace.

- **Les cultures intercalaires.** Dans de nombreux systèmes de culture en Afrique subsaharienne, les différentes cultures sont "intercalées", c'est-à-dire plantées sur la même parcelle en même temps. Ces arrangements de cultures intercalaires doivent prendre en compte la croissance et les besoins des cultures individuelles, afin de minimiser la concurrence des cultures intercalées. Parfois, la plantation de l'une des cultures est retardée pour minimiser la concurrence. Par exemple, alors que les haricots peuvent être intercalés efficacement avec le maïs dans l'espacement normal du maïs, l'espacement du maïs doit être augmenté (c'est-à-dire moins de plantes par hectare) lorsqu'il est intercalé avec le soja qui nécessite relativement plus d'espace par rapport aux haricots. Les légumineuses peuvent être intercalées avec le manioc assez facilement pourvu que l'espacement du manioc soit légèrement réduit pour permettre aux légumineuses de bien pousser et minimiser la concurrence. De toute évidence, certaines pratiques de gestion des cultures intercalées doivent être adaptées aux besoins de chaque culture en termes d'espacement, de gestion des éléments nutritifs, de dates relatives de semis ou de pratiques de lutte contre les ravageurs et les maladies.

4.11.1 L'agriculture de conservation (AC): une solution universelle?

L'agriculture de conservation (AC) est sous-tendue par trois principes de base:

- La perturbation du sol est minimisée par une réduction partielle ou totale du labour.
- Le sol est recouvert de matière organique (résidus de récoltes ou plantes de couverture) - au moins 30 % du sol recouvert.
- Les rotations/associations de cultures sont utilisées.

Ces trois principes sont d'importantes *options* pouvant être utilisées en GIFS maïs, comme pour toutes les techniques, leur utilisation devrait dépendre de l'évaluation au cas par cas des exigences locales dans le cadre de l'adaptation aux conditions locales. L'AC offre un certain nombre d'avantages, dont:

- le semis rapide de larges zones; et
- la réduction ou l'élimination de l'érosion des sols.

Un certain nombre d'obstacles ont été identifiés, toutefois, lorsque la mise en œuvre totale de l'AC a été tentée sans adaptation locale suffisante:

- Il se pourrait qu'il n'y ait pas suffisamment de résidus de récoltes disponibles pour le paillage du fait qu'ils fournissent davantage de revenus à l'agriculteur sur le court terme s'ils sont utilisés pour l'alimentation du bétail.
- L'AC aboutit souvent à une diminution des rendements à court terme, et une augmentation importante des récoltes n'est atteinte qu'à long terme.
- L'AC peut augmenter les besoins en main-d'œuvre sauf si les herbicides pour la lutte contre les mauvaises herbes sont disponibles et économiques.
- La mise en application de l'AC dans sa totalité nécessite un changement fondamental du système de culture, ce qui pourrait ne pas s'avérer pratique ou économique pour l'agriculteur.

En outre, le potentiel d'accumulation du carbone organique des sols dépend de leur texture (notamment de leur teneur en argile) et la mesure dans laquelle la capacité du sol à stocker du carbone a déjà été atteinte.

L'AC peut ne pas entraîner une meilleure efficacité agronomique de l'utilisation des engrais. L'efficacité agronomique peut même être réduite à cause du lessivage prolongé consécutif à l'augmentation accrue de l'infiltration d'eau et à une plus grande continuité du système des macropores du sol.

4.12 L'agriculture biologique

L'agriculture biologique, l'agriculture à faible coefficient d'intrants et l'agriculture pérenne mettent en exergue la dépendance aux ressources organiques pour fournir des nutriments qui maintiennent la fertilité des sols et produisent des rendements économiques. Ces techniques peuvent à première vue sembler attrayantes, parce qu'elles indiquent qu'il est possible d'atteindre des rendements économiques de cultures sans avoir recours aux engrais minéraux.

De nombreuses recherches ont montré qu'à l'exception des cas spécifiques où la production pour des marchés spécialisés est possible, les engrais minéraux sont un élément essentiel pour assurer le développement durable de l'agriculture parce que:

- Les stocks des nutriments du sol dans de nombreuses régions d'Afrique subsaharienne sont déjà épuisés et nécessitent une reconstitution.
- Les agriculteurs manquent de quantités de ressources organiques suffisantes pour reconstituer et maintenir les stocks des nutriments du sol.
- D'importantes réponses économiques aux engrais minéraux sont obtenues sur une grande partie de l'Afrique subsaharienne.
- Les ressources organiques sont volumineuses et leur gestion nécessite beaucoup de travail. L'application de grandes quantités de ressources organiques est souvent insuffisante pour surmonter les carences en nutriments.

La GIFS préconise l'utilisation d'engrais minéraux *en combinaison avec* les ressources organiques parce que la recherche a montré que leur utilisation combinée offre plus d'avantages que l'utilisation exclusive de ressources organiques ou d'engrais minéraux.

4.13 Capacité d'adaptation des interventions

Au final, l'adoption de toute pratique est régie par l'adaptation des performances techniques (P) à l'échelle du champ, des opportunités et des compromis (C) à l'échelle de la ferme et du village, et le contexte des systèmes d'exploitation agricole (C) à l'échelle régionale. L'adoption devrait tenir compte des performances de la technologie, de compromis avec d'autres options, et de la pertinence au système de culture, ainsi que des interactions entre ces trois éléments (Figure 4.3).

$$\text{Adoption} = \text{Performances} + \text{Compromis} + \text{Contexte} + (\text{PCC})$$

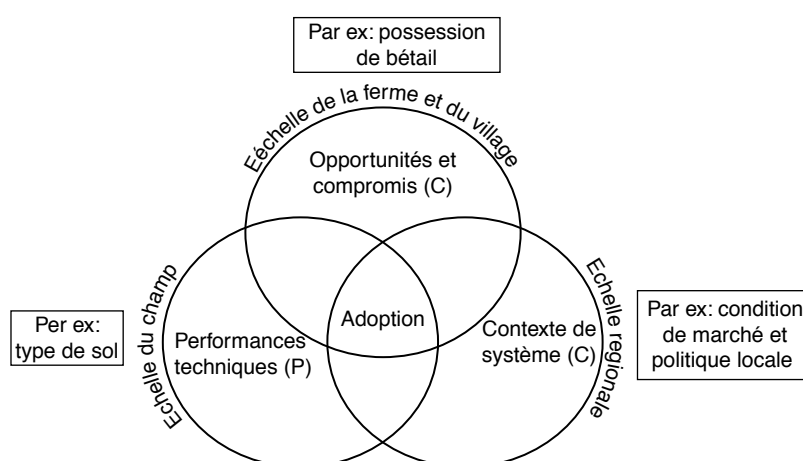


Figure 4.3 Un certain nombre de conditions préalables doivent être remplies avant que l'agriculture de conservation (AC) soit avantageusement adoptée par les agriculteurs dans une localité donnée.

4.14 Economie

Le capital du sol est le plus important actif productif de l'agriculteur. Les agriculteurs font usage de cet actif en le combinant avec une variété d'intrants comme le travail, les semences, l'engrais et les intrants organiques, afin de produire un extrant d'une culture donnée pour la nourriture, les revenus ou les matières premières pour d'autres processus productifs.

Le capital est simplement défini comme argent, marchandises ou biens utilisés pour générer des revenus. Dans le cas du "capital sol", un agriculteur devra dépenser davantage sur d'autres intrants pour maintenir ses extrants si son capital sol diminue. Le capital sol se compose de plusieurs propriétés, telles que la teneur en éléments nutritifs (c'est-à-dire la fertilité), la matière organique, l'humidité et les organismes vivants, qui tous évoluent dans le temps et sont inégalement répartis dans les champs et dans le profil du sol. Par conséquent, le maintien de ce capital exige le traitement et maintien de toutes les propriétés de cette ressource.

Comme dans le cas des autres types de capital agricole (par exemple, équipement agricole), l'agriculteur engage des coûts pour maintenir le capital sol, et il existe deux principaux éléments de la composante du coût:

- **Les coûts directs** sont les coûts engagés par l'agriculteur pour l'effort (c'est-à-dire le travail), les intrants (par exemple, engrais), les équipements et les structures physiques nécessaires au maintien ou à l'amélioration du capital sol.
- **Les coûts indirects** (ou manque à gagner) comprennent toute perte de production future résultant de la perte du capital sol due aux pratiques non optimales présentes d'utilisation du sol.

Les coûts directs sont facilement évalués par l'agriculteur, car ils concernent directement les dépenses de main-d'œuvre, de matériaux et d'équipements. Toutefois, les coûts indirects sont à long terme et ne sont pas faciles à évaluer. Les avantages d'investir dans le capital sol sont également doubles:

- Les avantages à court terme découlant des récoltes annuelles qui représentent une source de revenus et peuvent également être réinvesties les années suivantes par l'achat d'engrais, ou le paiement pour des travaux de construction de structures de conservation du sol et de l'eau.
- Les avantages à long terme se traduiront par l'augmentation ou le maintien du rendement à l'avenir en raison de la qualité, de l'entretien ou de l'amélioration du sol.

Par conséquent, la prise de décisions concernant le maintien du capital sol exige une évaluation dynamique et complexe des coûts et avantages directs et indirects à la fois sur le court et le long terme. À titre d'illustration, il est utile d'examiner le cas du capital sol sur une terre appartenant à un agriculteur typique et ce qui peut arriver à ce capital au cours du temps avec la culture continue du maïs (Tableaux 4.3 et 4.4).

Tableau 4.3 Production continue du maïs sans GIFS.

Paramètre	Unités	Année				
		1	2	3	4	5
N disponible dans le sol	kg/ha	60	30	15	7	4
Exportation de N par le maïs sans utilisation d'engrais	kg/ha	30	15	8	3	2
Rendement sans utilisation d'engrais	kg/ha	1.000	900	700	500	350
Valeur de la baisse de rendement (rendement initial - rendement actuel x prix de marché du maïs ^a)	\$	0	40	120	200	260
Bénéfice net (rendement x prix - coûts indirects dus à la baisse du rendement)	\$	400	320	160	0	-120

^a prix du maïs = 0,40 \$ /kg.

Tableau 4.4 Production continue du maïs avec GIFS.

Paramètre	Unités	Année				
		1	2	3	4	5
N disponible dans le sol (kg/ha)	kg/ha	60	60	60	60	60
Exportation de N par le maïs sans utilisation d'engrais	kg/ha	30	30	30	30	30
Engrais (restauration de N épuisé)	kg/ha	23	23	23	23	23
Fumier organique (restauration de la mat. org. et N)	kg/ha	7	7	7	7	7
Rendement avec utilisation d'engrais et de fumier	kg/ha	1.100	1.100	1.100	1.100	1.100
Fumier (coût du travail de collecte)	\$/ha	20	20	20	20	20
Engrais	\$/ha	25	25	25	25	25
Bénéfice net (rendement x prix ^a) - coûts directs		395	395	395	395	395

^aprix du maïs = 0,40 \$ /kg, engrais = 0,5 \$ /kg

Sans GIFS, le capital sol sous forme de N inhérent diminue chaque année avec la culture du maïs, sur une période de 5 ans. Pour des raisons de simplicité nous supposons que N total dans le sol est de 60 kg/ha et que le maïs peut utiliser 30 kg N/ha dans la première saison, mais comme la teneur en N baisse, la culture absorbe moins de N au cours des années ultérieures (Tableau 4.3). On peut également supposer que la restitution naturelle de N est négligeable et que par conséquent le stock de N baisse avec chaque année de culture. Le coût indirect de cette baisse du capital sol est une perte sur le rendement cumulée de 1.550 kg de maïs par rapport à ce qui aurait pu être produit si le capital N avait été maintenu. En supposant un prix de 0,40 \$ /kg de maïs, la perte totale sur une période de 5 ans serait de \$ 620.

Lorsqu'un agriculteur pratique la GIFS, apportant résidus organiques et engrais minéraux au sol sur une période de 5 ans (Tableau 4.4), en supposant qu'un sac de 50 kilogrammes d'urée (46% de N, 23 kg N/ha) et 1 t d'engrais organiques sont appliqués sur ce sol pour un coût de 45\$/an (225 dollars pour 5 ans), le coût de maintien de cette situation est inférieur au coût indirect de réduction de rendement (\$ 620) suite à l'épuisement de N comme illustré dans le tableau précédent (Tableau 4.3). Ce qui illustre le fait que dans le temps, le maintien du capital sol peut produire une plus grande marge bénéficiaire que d'en permettre la baisse. L'application d'engrais non organiques et de fumier augmente également le rendement au cours de la première année. Par conséquent, l'utilisation des intrants a l'effet double premièrement d'augmenter le rendement et deuxièmement de maintenir la fertilité des sols, du coup maintenant la production au fil du temps.

Du point de vue de l'agriculteur, deux contraintes majeures affectent la capacité à investir dans le capital sol:

- le coût des intrants; et
- la valeur de la production.

Toutefois, si la valeur de la production est inférieure au coût des intrants au cours d'une année donnée, l'agriculteur peut subir une perte. À long terme cependant, si ce que l'on retire du sol (par exemple, les nutriments) est supérieur à ce qui y est investi, le capital perdra de la valeur, le rendement diminuera et le revenu global dans le temps sera moindre que dans les cas où l'engrais et le fumier sont utilisés.

Etant donné que les agriculteurs de subsistance visent plus à maximiser la production alimentaire que le revenu, ils sont peu susceptibles d'avoir suffisamment de ressources financières à investir dans le maintien du capital sol. En revanche, les agriculteurs commerciaux produisant des cultures de rente sont plus susceptibles de disposer de ressources financières suffisantes et de la motivation d'investir dans le capital sol.

4.15 Conclusions

Dans cette section, nous avons:

- examiné en détail l'utilisation des intrants organiques et minéraux;
- relevé un éventail de pratiques qui favorisent ou maintiennent le capital sol;
- évalué les moyens de mesurer l'efficacité d'utilisation des nutriments et les méthodes de prévention de pertes; et
- examiné les aspects économiques de l'adoption de la GIFS.

Dans la prochaine section, nous allons débattre de la mise en œuvre de la GIFS en détail.

4.16 Liste d'ouvrages à lire

Cette liste sert de guide de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d'une explication *en italique*. Là où la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Giller K. (2000) Translating science into action for agricultural development in the tropics: an example from decomposition studies. *Appl Soil Ecology* 14,1–3.

Les figures 4.1 et 4.2 sont présentées et examinées dans ces deux articles.

Giller, K.E. (2001) Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CAB International, Wallingford.

Outre le texte intégral de base, voir www.N2Africa.org pour de nombreux matériaux d'apprentissage sur la fixation de l'azote par les légumineuses.

Giller, K.E., Cadisch, G., Palm, C.A. (2002) The North-South Divide! Organic Wastes, or Resources for Nutrient Management? *Agronomie* 22, 703–709.

Giller, K.E., Witter, E., Corbeels, M., Tittonell, P. (2009) Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view. *Field Crops Research* 114, 23–34.

Les avantages potentiels de l'agriculture de conservation sont examinés par rapport aux contraintes et opportunités rencontrées par les petits agriculteurs.

Kamprath, E.J. (1970). Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings* 34, 252–254.

Cet article classique indique que le calcul des besoins en chaulage des sols tropicaux acides devrait être fondé sur la réduction de la saturation en aluminium vers < 15% plutôt que sur la modification du pH du sol.

Palm, C., Myers, R. and Nandwa, S. (1997) Combined Use of Organic and Inorganic Nutrient Sources for Soil Fertility Maintenance and Replenishment. In: Buresh, R.J., Sanchez, P.A. and Calhoun, F. (Eds.) *Replenishing soil fertility in Africa*. Soil Science Society of America, Indianapolis, USA, pp. 193–219.

Le graphique d'origine de la figure 4.1 est présenté et discuté ici.

Palm, C.A., Gachengo, C.N., Delve, R.J., Cadisch, G., Giller, K.E. (2001) Organic inputs for soil fertility management in tropical agroecosystems: Application of an organic resource database. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83, 27–42.

Palm, C.A., Giller, K.E., Mafongoya, P.L., Swift, M.J. (2001). Management of organic matter in the tropics: Translating theory into practice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61, 63–75.

Ces deux articles décrivent les différents rôles des amendements organiques dans la gestion de la fertilité des sols dans les zones tropicales, par rapport aux qualités et quantités des ressources organiques disponibles.

Piha, M.I. (1993). Optimizing fertilizer use and practical rainfall capture in a semi-arid environment with variable rainfall. *Experimental Agriculture* 29, 405–415.

Une approche pratique pour varier les taux d'engrais utilisés en fonction de la quantité de pluies reçues durant la saison de croissance est présentée.

Smaling, E.M.A., Stoorvogel, J.J., Windmeijer, P.N. (1993) Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. II. District scale. *Fertilizer Research* 35, 237–250.

Stoorvogel, J.J., Smaling, E.M.A., Janssen, B.H. (1993) Calculating soil nutrient balances in Africa at different scales. I. Supra-national scale. *Fertilizer Research* 35, 227–235.

Deux documents classiques qui expliquent l'utilisation des bilans d'éléments nutritifs et la baisse de la fertilité ainsi que le rapport de ces deux éléments avec la durabilité de la production agricole.

Vanlauwe, B., Giller, K.E. (2006) Popular myths around soil fertility management in sub-Saharan Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 116, 34–46.

Des malentendus courants concernant la gestion de la fertilité des sols sont pulvérisés dans cet article général. Lecture essentielle pour tous les acteurs de ce domaine du développement !



Variété locale vulnérable

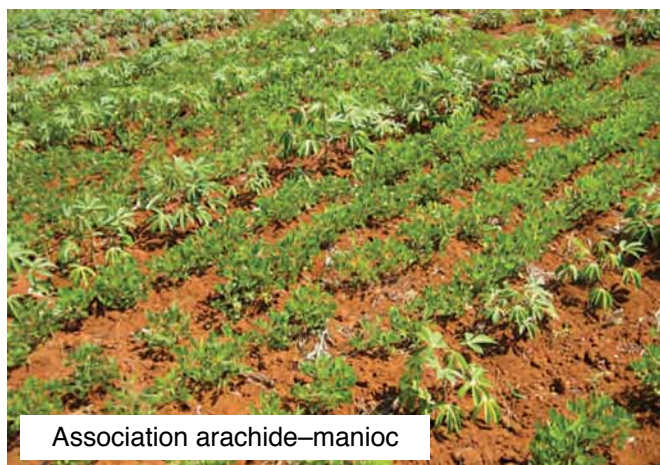


Variété améliorée Nsansi

Photo 4.1 Dans l'ouest de la RDC, le germoplasme amélioré de manioc (à droite) est une condition préalable à la maximisation de l'efficacité agronomique d'utilisation d'intrants externes comme l'engrais, car les variétés vulnérables à la maladie (dans ce cas le virus de manioc) (à gauche) ne demandent pas beaucoup d'éléments nutritifs.



Photo 4.2 Les légumineuses à graines à double usage produisent une grande quantité de nodules efficaces et fixent des quantités considérables de N à partir de l'atmosphère.



Association arachide–manioc



2^e culture de haricot dans un système

Photo 4.3 Des mesures agronomiques spécifiques peuvent augmenter la productivité du système à base de manioc dans le Sud-Kivu, à l'est de la RDC.



Photo 4.4 Des variétés de soja à double usage (à droite) fournissent plus d'intrants organiques et fixent plus d'azote gazeux de l'atmosphère par rapport aux variétés à courte durée (à gauche).



Photo 4.5 Il peut être possible de planter deux variétés de soja intercalées avec du manioc pour une courte durée avant que le feuillage du manioc ne se ferme.



Photo 4.6 Le maïs intercalé avec le soja.



Photo 4.7 Essais de réponse à l'engrais N sur une petite exploitation sur des sables de granite dans le Chinyika, au Zimbabwe.



Photo 4.8 Effets d'engrais N sur la productivité du maïs sur des sols déficients en N, et effets de rotation des légumineuses.



Photo 4.9 Un des effets indirects de l'amélioration de la fertilité des sols est l'amélioration de la tolérance des plantes cultivées à une infestation du striga.



Photo 4.10 Le sarclage retardé va réduire la réponse des cultures à l'engrais dans cette culture combinée de maïs et de pois d'Angole dans l'ouest du Kenya.



Photo 4.11 Le maïs intercalé avec le pois d'Angole. Le pois d'Angole sera récolté après le maïs.



Photo 4.12 Le maïs intercalé avec le manioc. Le maïs sera récolté avant que le manioc n'atteigne la maturité.



Photo 4.13 Rotation des cultures et conservation de l'eau à l'aide de cloisons afin d'améliorer la productivité des cultures.



Photo 4.14 Le labour selon les courbes de niveau est une option efficace de gestion de l'eau en GIFS dans les zones semi-arides.



Photo 4.15 Diguettes construites par des agriculteurs pour gérer les sols sur des terrains en pente au Burundi.



Photo 4.16 Terres en pente sans diguettes ou terrasses au sud-ouest de l'Ouganda.



Photo 4.17 Le maïs planté sans engrais P (1) est rabougri par rapport aux plants de maïs plantés en même temps mais avec engrais P (2). Les cultures des deux parcelles ont reçu suffisamment d'engrais N et K. La croissance du maïs est retardée d'environ 2 mois lorsque l'engrais P n'est pas appliqué (1). Ces retards peuvent passer inaperçus, si toutefois, il n'y a pas de parcelles de référence montrant la croissance végétative où les carences nutritionnelles ont été éliminées.



Photo 4.18 Le développement des tiges et des racines est meilleur pour la plante de droite qui a reçu l'engrais P.



Photo 4.19 La floraison a déjà commencé à une hauteur de 40 cm pour ce maïs, indiquant une très médiocre fertilité des sols et probablement une carence en P.



Photo 4.20 Déficience en azote pour les bananiers des régions montagneuses en Ouganda.



Photo 4.21 Une plante saine et une autre provenant des régions montagneuses déficientes en N croissant dans une serre.



Photo 4.22 Des essais soustractifs sont un outil pratique au champ pour l'évaluation de la réponse aux différents nutriments.



Photo 4.23 Déficience en azote dans le maïs (premier plan) et effets des engrais azotés sur croissance du maïs (arrière-plan).



Photo 4.24 Jeune plant de maïs présentant clairement des symptômes de carence en P (1) dont le retard de croissance (en comparaison avec d'autres plantes qui ont reçu l'engrais P) et une coloration violacée sur les feuilles. Le rouge des feuilles des vieux plants de maïs (2) n'a probablement pas été causé par une déficience en P.



Photo 4.25 Symptômes de carence en K pour du soja planté sur des sols sableux déficients en K dérivés du granite.



Photo 4.26 Une multi-déficience en nutriments peut limiter la productivité des sols dégradés. Ces plants de maïs présentent une déficience en Zn.



Photo 4.27 Les résidus de récolte et les herbes sont appliqués comme paillis sur les cultures de bananes.



Photo 4.28 Les nutriments contenus dans le fourrage de canne à sucre qu'on a laissé dans le champ après la récolte profiteront à la prochaine récolte.



Photo 4.29 Dans ces champs au Rwanda, les résidus organiques sont entassés en tas avant qu'ils ne soient épandus.



Photo 4.30 Une grande charge de maïs avec du fourrage.

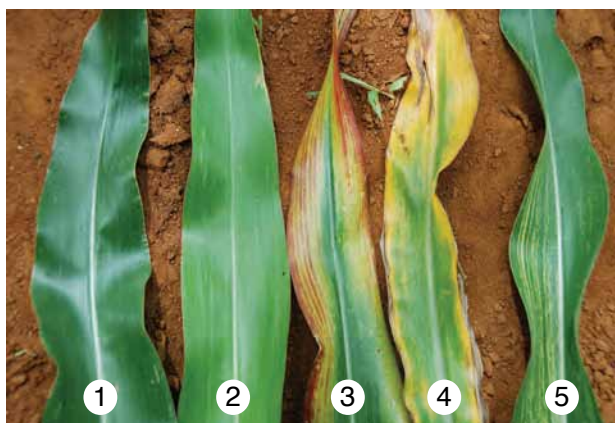


Photo 4.31 Les symptômes de carence en nutriments sont souvent visibles sur les plantes. Une feuille de maïs saine (1), par rapport à des feuilles présentant une déficience en N (2), une déficience en P (3), une déficience en K (4) et une maladie (5).



Photo 4.32 Des vaches explorant des fourrages améliorés dans le centre du Kenya.



Photo 4.33 Monticules de terre construits par les agriculteurs pour la plantation d'igname dans le nord du Ghana.



Photo 4.34 Sur le long terme, la GIFS peut contribuer à accroître la résilience des cultures à la sécheresse.



Photo 4.35 Engrais placé dans une bande adjacente à la rangée de cultures.



Photo 4.36 Une capsule de bouteille de soda contient environ 6 g d'engrais, une mesure utile pour le microdosage de l'engrais (c'est-à-dire l'application de petites quantités).

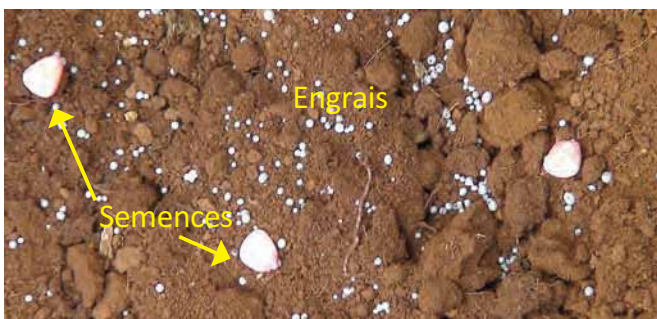


Photo 4.37 Placement incorrect de l'engrais de fond au moment de la plantation. La germination des semences peut être affectée par une "brûlure".

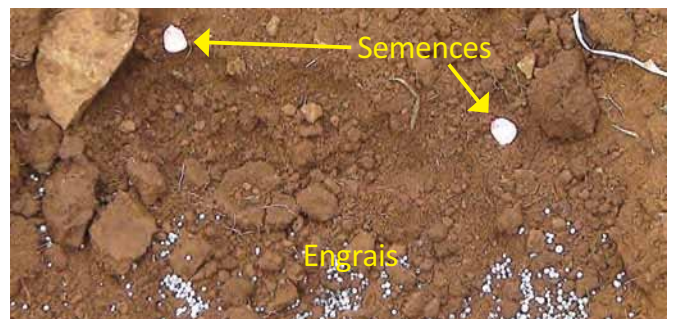


Photo 4.38 L'engrais appliqué correctement dans une bande adjacente aux semences dans le sillon élimine le risque de "brûlure".



Photo 4.39 Les arbuscules formés par toutes les espèces de champignons mycorhiziens sont des sites intracellulaires d'échange d'éléments nutritifs entre l'hôte et le champignon.

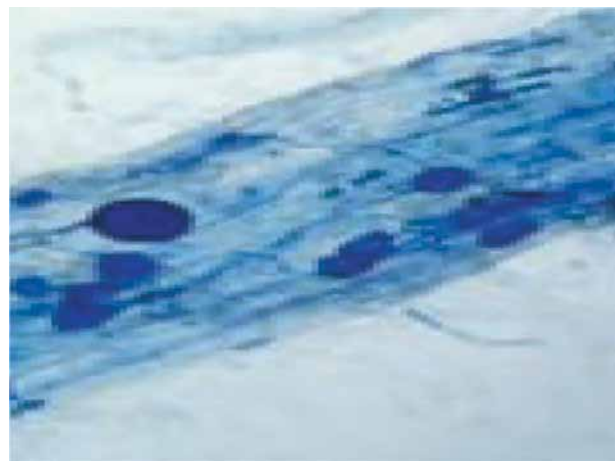


Photo 4.40 Les vésicules formées par certaines familles de champignons mycorhiziens arbusculaires présentent l'aspect de structures de stockage avec un contenu huileux.

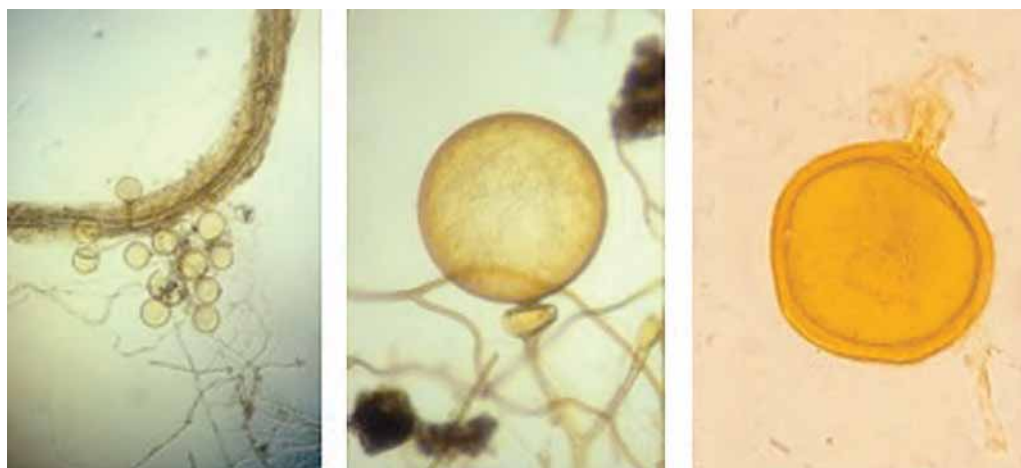


Photo 4.41 Grappes de spores de champignons mycorhiziens arbusculaires à l'extérieur (à gauche) et dans la racine de la plante (au milieu et à droite). Les spores peuvent être formées individuellement ou en groupes, elles peuvent varier en taille et être associées à un réseau d'hyphes. Elles comprennent toutes des propagules infectieuses.



Photo 4.42 Application d'engrais azoté sur de jeunes plants de maïs.



Photo 4.43 L'engrais peut être incorporé dans le sol pendant le désherbage après l'épandage.



Photo 4.44 Les nodules sur les racines de légumineuse dont l'inoculation a été bien faite. Les nodules qui fixent activement le gaz N_2 sont d'une couleur rougeâtre à l'intérieur.

5 Cibler les options de la GIFS



5.1 Introduction

Dans la Section 2, nous avons expliqué la raison d'être et la nécessité de la GIFS dans les divers systèmes d'exploitation agricole d'Afrique sub-saharienne. Les principes de GIFS ont été décrits dans la Section 3 et les pratiques communes utilisées dans cette gestion ont été détaillées dans la Section 4. Dans cette section, nous donnerons les lignes directrices pour adapter les options GIFS aux divers types d'exploitations agricoles et systèmes d'exploitation agricole africains. Nous supposons que le lecteur est un vulgarisateur employé par le gouvernement ou une ONG œuvrant à l'amélioration de la productivité auprès des petits producteurs au niveau de district en Afrique sub-saharienne.

Dès le départ, le vulgarisateur doit envisager comment il va étendre la mise en œuvre de la GIFS, afin d'amener un changement à grande échelle dans sa zone de travail. En même temps, la GIFS est un processus progressif d'amélioration de la fertilité du sol. Peu de choses peuvent être réalisées en une seule saison, voire en une année et le vulgarisateur d'habitude n'atteint de bons résultats que grâce à une collaboration soutenue avec les agriculteurs sur plusieurs années.

Même si le vulgarisateur peut être assez familier avec sa zone de travail, il lui sera utile de procéder à une analyse des systèmes d'exploitation agricole dans cette zone avant de commencer toute activité pratique de GIFS. En principe, plusieurs vulgarisateurs travaillent en équipe et effectuent une analyse des systèmes d'exploitation agricole à tour de rôle dans leurs zones de travail respectives. Associer une personne externe permet souvent de révéler d'importantes caractéristiques du système d'exploitation agricole qui peuvent échapper à une personne locale.

On trouve les petits systèmes des petites exploitations agricoles dans divers environnements biophysiques et socio-économiques, et les ménages mettent en place différentes stratégies de subsistance suivant les opportunités et les défis rencontrés dans chaque environnement. Au sein des localités et des villages, les ménages diffèrent en termes de dotation en ressources (la superficie de terre et le bétail qu'ils possèdent), d'orientation de la production (sécurité alimentaire ou commercialisation) et d'objectifs (survie ou profit), d'appartenance ethnique, d'éducation, d'expérience et de compétences de gestion et d'attitudes à l'égard du risque.

5.2 Analyse des systèmes d'exploitation agricole (FSA)

Un système d'exploitation agricole comprend toutes les composantes d'une entreprise agricole, à savoir:

- les terres cultivées, les systèmes de culture et d'élevage;
- les pâturages et boisements collectifs gérés par plusieurs agriculteurs dans une communauté; et
- les activités extra-agricoles.

Tous ces éléments doivent être considérés dans le cadre des marchés pour la terre, la main-d'œuvre, les intrants nécessaires à la production, les produits agricoles, le crédit et les connaissances.

L'analyse des systèmes d'exploitation agricole fournit les informations et les données requises pour concevoir, planifier, mettre en œuvre, suivre et évaluer les interventions visant à améliorer la productivité et la durabilité d'un système de culture. La FSA est utilisée pour identifier des "types", ou des groupes d'agriculteurs ayant les mêmes défis et opportunités en termes d'amélioration auxquels les vulgarisateurs peuvent faire plus ou moins la même recommandation. La FSA est donc un outil utile pour évaluer les possibilités de mettre en œuvre la GIFS dans les systèmes d'exploitation agricole en Afrique sub-saharienne (Figure 5.1).

Un produit important de la FSA est l'identification et la caractérisation de la ferme et des systèmes d'exploitation agricole les plus dominants dans la zone cible. Ceci est important parce que les maigres ressources en vulgarisation devraient être canalisées vers les exploitations et les systèmes d'exploitation agricole qui présentent le plus grand potentiel, dans une région ou un district donné, pour améliorer la productivité et les moyens de subsistance en introduisant la GIFS.

Les informations résultant de l'analyse des systèmes d'exploitation agricole peuvent être utilisées par les vulgarisateurs, les agronomes, les décideurs publics, les économistes ou une équipe pluridisciplinaire. Indépendamment des utilisateurs, la FSA doit représenter la réalité que vivent les agriculteurs de la localité concernée.

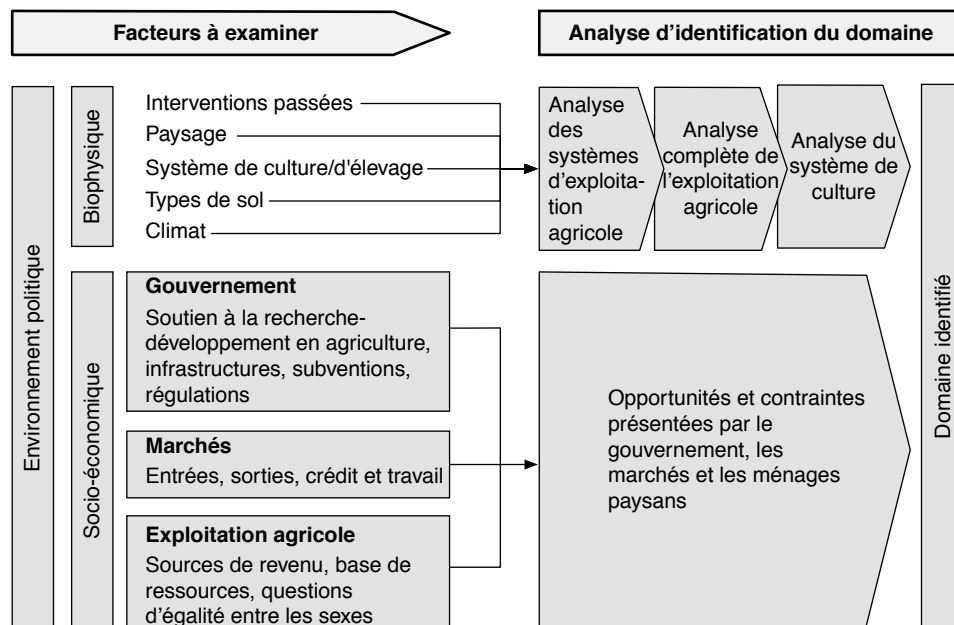


Figure 5.1 L'analyse des systèmes d'exploitation agricole implique une analyse approfondie de l'environnement biophysique ainsi que des facteurs socio-économiques et des aspects de politique qui influent sur l'agriculture. Les opportunités et les contraintes sont identifiées dans le contexte des systèmes d'exploitation agricole et des systèmes de culture analysés, permettant l'identification des domaines visés par les activités de terrain.

L'analyse FSA devrait être effectuée avant de commencer toute autre activité sur le terrain. Il est souvent utile de mettre à jour l'étude chaque année, pour faire une évaluation des changements intervenus dans l'environnement d'exploitation et comme suite aux activités du projet. Les résultats de l'analyse devraient être rassemblés et stockés dans le bureau de district pour que les autres acteurs puissent les utiliser à l'avenir.

La FSA doit être effectuée de manière à ce que:

- les agriculteurs soient le sujet et non pas l'objet de l'enquête et participent pleinement à l'étude,
- l'étude prenne en compte l'incidence du genre sur l'accès aux ressources et aux marchés, en identifiant les opportunités et les contraintes de l'adoption de la GIFS liées au genre,
- la diversité des systèmes d'exploitation agricole dans un domaine particulier soit prise en compte et analysée,
- l'étude ne soit pas biaisée par la période de l'année (saison) au cours de laquelle les enquêtes ont été effectuées,
- le "biais du bord de la route" soit évité en marchant effectivement dans la zone sous enquête pour se faire une idée du degré d'hétérogénéité au sein et entre les exploitations.

Une analyse FSA correctement conçue et menée offre les éléments suivants:

- une identification des groupes de types de systèmes d'exploitation agricole au sein du système de culture;
- une évaluation de la diversité des revenus agricoles et des dotations en ressources par rapport aux groupes ci-dessus et aux possibilités d'amélioration de la productivité;
- un calendrier agricole des principales activités, dont les périodes de semis et de récolte pour les cultures majeures au sein du système de culture;
- des informations quantitatives sur les flux de services, de produits agricoles et de nutriments à l'intérieur et entre les exploitations agricoles et les systèmes de culture;





LA NOUVELLE VARIETE DE MAÏS INTERCALEE AVEC LE SOJA SE PORTE A MERVEILLE

VOUS GAGNEREZ ASSEZ DU MAÏS ET DU SOJA POUR COUVRIR TOUS LES COUTS ET VOUS EN TIREREZ DU PROFIT DONT BENEFICIERA VOTRE FAMILLE

- une analyse des écarts de rendement et de productivité dans toutes les entreprises agricoles et d'élevage au sein du système de culture;
- une évaluation des secteurs clés de risque au sein du système d'exploitation agricole (par exemple, les conditions météorologiques, les prix); et
- une évaluation de la rentabilité du système d'exploitation agricole y compris l'identification des principaux facteurs de changement dans la productivité.

L'équipe FSA aura besoin de:

- cartes (sol, géologie, végétation, frontières administratives et politiques);
- statistiques agricoles et autres du bureau local de district; et
- un appareil GPS (système mondial de localisation) qui fournit les moyens de géo-référencer et, plus tard, de cartographier les points de données (par exemple, emplacements des exploitations agricoles, fournisseurs d'intrants).

Nous allons maintenant aborder diverses activités qui peuvent être menées dans le cadre de la FSA.

5.2.1 Historique des activités passées

Il est fort probable qu'il y ait déjà eu plusieurs projets et programmes agricoles dans un district donné. Il est donc important de chercher des informations sur les interventions passées (programmes publics, projets, initiatives paysannes) pour avoir une idée de leurs succès et échecs.

5.2.2 Collecte de données biophysiques

Les données climatiques aident l'équipe à comprendre le déroulement des événements (préparation de la terre, semis, récolte) et le risque lié aux systèmes de culture. Les informations les plus importantes sont la pluviosité (mm/mois) et la durée des pluies (nombre de jours de pluie par mois). Les données des 5 dernières années sont nécessaires pour qu'il soit possible d'évaluer la variabilité (mm/an, période de la saison pluvieuse). D'autres données (par exemple, la température, le rayonnement solaire, et la direction et la vitesse du vent) sont utiles, mais pas indispensables pour les activités relatives à la GIFS.

Des stations météo électroniques abordables et fiables sont maintenant disponibles, et devraient être considérées comme matériel essentiel dans tout projet de moyenne envergure.

Les déficits hydriques dans le sol (mm/an) peuvent être calculés en fonction de données pluviométriques en utilisant un modèle simple de tableur.

5.2.3 Identification des systèmes d'exploitation agricole dominants dans chaque terroir

Les systèmes d'exploitation agricole dominants peuvent être trouvés dans la plupart des régions d'Afrique sub-saharienne. Par exemple, dans une zone donnée les agriculteurs peuvent cultiver des céréales (par exemple, le maïs ou le riz) en rotation ou en association avec une légumineuse à grains. Les résidus de cultures servent d'aliments du bétail et les déjections animales sont retournées dans le champ. Au sein de chaque système de culture, toutefois, nous allons certainement trouver beaucoup de variantes:

- Les agriculteurs les plus riches auront de plus grandes exploitations et produiront probablement un excédent de produits agricoles qui peuvent être vendus sur le marché local. Ils sont plus susceptibles de nourrir leur bétail de résidus de cultures et peuvent même les acheter chez les petits exploitants du voisinage, afin qu'ils puissent élever davantage de bétail. Les agriculteurs les plus riches utilisent peut-être déjà des semences améliorées et des engrais.
- Les agriculteurs pauvres ont généralement de petites exploitations qui ne peuvent pas produire suffisamment de nourriture pour répondre aux besoins de subsistance. Les résidus de récolte peuvent être vendus aux grandes exploitations, car le paysan ne peut pas se permettre d'acheter des animaux d'élevage. Les agriculteurs pauvres manquent souvent de ressources financières pour acheter des intrants tels que les semences et les engrais. L'agriculture n'est souvent qu'une partie de l'économie des ménages et certains membres de la famille peuvent être engagés dans des activités rémunératrices non-agricoles ou comme main-d'œuvre.

Ainsi, même si les agriculteurs riches et les agriculteurs pauvres peuvent être confrontés à des problèmes analogues en termes de gestion de la fertilité, les points d'entrée pour introduire les meilleures pratiques de GIFS et les délais pour opérer des améliorations agricoles peuvent être très différents. Les agriculteurs ne font pas partie de groupes distincts de "riches" et de "pauvres", mais plutôt nous trouvons des variations continues en termes de "dotation en ressources". En outre, la fertilité des sols n'est pas uniforme au sein de chaque exploitation. En effet, on peut trouver des champs plus fertiles près de la maison du paysan et des champs moins fertiles plus éloignés de la maison, ainsi que des sols appauvris ou dégradés sur des terres communes.

5.2.4 Typologie des agriculteurs

La plupart des données d'enquête montrent qu'il existe une grande diversité de ménages au sein d'un terroir. Les agriculteurs peuvent être regroupés en catégories selon les caractéristiques de leur système de culture, la contribution des activités non agricoles au revenu du ménage, et la possession du bétail. Ceci permet aux vulgarisateurs d'identifier les groupes cibles, puis planifier les activités et les programmes conçus pour répondre à des objectifs bien précis (par exemple, intensification du rendement sur les grandes exploitations et amélioration de la sécurité alimentaire sur les petites exploitations).

Les questions clés qui devraient être incluses dans les enquêtes menées dans le but de classer les agriculteurs pourraient comprendre les éléments suivants:

1. la superficie totale détenue par le ménage (ha).
2. la superficie totale cultivée par le ménage (ha) y compris la superficie des champs proches de la maison, des champs éloignés de la maison et des champs de brousse.
3. la superficie totale occupée par les cultures de rente (ha).
4. la taille du ménage (nombre de membres de la famille vivant et mangeant à la maison).
5. la main-d'œuvre familiale (nombre de membres de la famille travaillant dans l'exploitation).
6. les membres de la famille travaillant temporairement et de manière permanente hors de l'exploitation.
7. l'âge et le niveau d'éducation du chef de ménage.
8. le pourcentage du revenu du ménage provenant des activités hors-exploitation et non agricoles.
9. le nombre d'années où le ménage a eu des revenus hors-exploitation.
10. l'orientation vers le marché (pourcentage de la production vendue).
11. le nombre d'animaux de race locale.
12. le nombre d'animaux de race améliorée.
13. le nombre de bœufs et de charrues ou d'autres équipements.
14. le nombre total d'autres animaux d'élevage par type (ovins, caprins, porcins, volaille).
15. le nombre de mois d'autosuffisance alimentaire.

Un exemple de typologie des exploitations agricoles pourrait être:

- **Type 1:** Des exploitations qui comptent principalement sur un emploi permanent hors de la ferme.
- **Type 2:** Des exploitations plus grandes, plus riches produisant des cultures de rente sur des sols plus fertiles.
- **Type 3:** Des exploitations dotées de ressources moyennes avec une autosuffisance alimentaire.
- **Type 4:** Des exploitations dotées de ressources moyennes ou faibles avec des sols à faible fertilité et une grande variabilité de la fertilité du sol au sein de l'exploitation et où les ménages dépendent en partie des activités non agricoles pour leurs revenus. Les agriculteurs possèdent quelques animaux.
- **Type 5:** Des ménages pauvres sur des sols à faible fertilité avec une grande variabilité de la fertilité du sol. Les membres de la famille sont employés localement comme ouvriers agricoles par des agriculteurs plus riches. Les agriculteurs possèdent quelques animaux.

L'utilisation passée de fumier et d'engrais dépend des ressources à la disposition des agriculteurs et a une forte influence sur l'état actuel de la fertilité des sols. Par conséquent, la typologie des exploitations agricoles est importante pour permettre d'expliquer la variabilité de la fertilité des sols. Les agriculteurs qui possèdent des animaux d'élevage sont généralement plus riches que les agriculteurs sans bétail.

5.2.5 Ratio terre/main-d'œuvre

Le ratio terres/main-d'œuvre peut être calculé à partir des données collectées pour la réalisation d'une typologie des agriculteurs. Par exemple, sur les terres exondées, les paysans pourraient être classés en deux groupes, fondés sur le ratio terre/main-d'œuvre:

- Les ménages paysans avec un faible ratio terre/main-d'œuvre (c'est-à-dire <1ha par membre du ménage) sont plus susceptibles d'avoir un faible niveau d'autosuffisance alimentaire (<3 mois) et de dépendre des activités non agricoles pour plus de 50% du revenu total.
- Les ménages paysans avec un ratio terre/main-d'œuvre élevé (c'est-à-dire >1ha par membre du ménage) sont plus susceptibles d'avoir un meilleur niveau d'autosuffisance alimentaire (>5 mois) et de dépendre des activités non agricoles pour moins de 50% du revenu total.

5.2.6 Évaluation des risques

L'équipe d'analyse des systèmes d'exploitation agricole doit faire une évaluation des principaux facteurs de risque et les classer en fonction de leur influence sur la rentabilité de l'exploitation agricole. Les principaux facteurs peuvent inclure:

- la sécheresse au cours de la principale saison agricole (fréquence, ampleur, effet sur le rendement agricole);
- les pluies tardives (fréquence, effet sur le rendement);
- la volatilité des prix des produits agricoles; et
- les prix des intrants et leur disponibilité.

5.3 Analyse des systèmes de culture

Nous allons maintenant décrire diverses activités qui peuvent être menées dans le cadre de l'analyse des systèmes de culture.

5.3.1 Inspection des champs

Il s'agit d'une inspection approfondie de tous les champs dans une exploitation donnée pour avoir une idée d'ensemble de la fertilité des sols et ses effets sur la production agricole. Étant donné qu'une seule visite d'une localité peut créer une fausse impression de la réalité, il serait nécessaire d'effectuer plusieurs visites. Un séjour d'une nuit dans la localité, peut-être comme visiteur payant d'une famille paysanne, peut offrir des possibilités d'obtenir des informations que les visites de jour ne peuvent jamais révéler. Une équipe FSA de quatre personnes peut collecter des données sur un système d'exploitation agricole en 5 jours environ.

Il est toujours important pour les ONG de débattre des programmes d'analyse des systèmes d'exploitation agricole avec des services gouvernementaux locaux avant de procéder au travail de terrain. Les agents locaux de l'État ont souvent une connaissance approfondie de la situation agricole locale et des projets et initiatives passés.

Évaluez la variabilité de la croissance des cultures, l'apparence et le rendement dans différents champs au sein de l'exploitation pour identifier les champs proches de la maison du paysan, les champs éloignés et les champs de brousse.

Pendant les inspections sur place, cherchez à comprendre les circonstances particulières de l'agriculteur:

- A-t-il du bétail et utilise-t-il le fumier animal sur sa propre exploitation ou vend-il le fumier à d'autres agriculteurs?
- Le fumier est-il appliqué sur tous les champs ou seulement sur certains, ou sur toutes ou certaines cultures sur son exploitation?
- Les résidus de cultures sont-ils laissés dans le champ, vendus ou utilisés pour nourrir les animaux de l'agriculteur?
- Si l'agriculteur n'a pas ses propres animaux d'élevage, achète-t-il le fumier animal pour l'utiliser sur son exploitation agricole et, dans l'affirmative, sur quels champs est-il appliqué?
- L'agriculteur utilise-t-il les engrais minéraux et, dans l'affirmative, quels sont les types et les quantités utilisés et quels sont les cultures et les champs fertilisés?

L'inspection des champs devrait être effectuée plusieurs fois au cours d'une saison agricole, car l'apparence des cultures change au fil du temps. Par exemple, une seule visite qui coïncide avec une courte période de sécheresse donnera probablement une idée erronée de la croissance des cultures et de la fertilité des sols. En outre, plusieurs visites peuvent être nécessaires avant que l'agriculteur prenne confiance pour révéler sa situation et ses problèmes aux visiteurs.

Il est souvent utile d'établir une carte de l'exploitation annotée avec des informations sur la rotation des cultures, le cycle des nutriments, les conditions du sol et les rendements.

5.3.2 Estimation des écarts de rendement

Une étape importante est de procéder à une analyse de la différence entre les rendements dans des champs d'essai gérés par des chercheurs où il n'y a pas de contraintes agronomiques et les rendements dans des champs des agriculteurs pour toutes les cultures majeures dans le système de culture. Ceci donne une indication de la portée des améliorations à attendre de l'introduction des techniques de la GIFS. L'équipe d'analyse des systèmes d'exploitation agricole devrait enquêter sur les aspects économiques de la réduction des écarts de rendement.

Les essais agronomiques peuvent avoir été effectués dans les champs des agriculteurs au sein du terroir sélectionné. Les essais visant à évaluer la réponse des cultures fournissent des informations utiles sur la réaction probable aux engrais minéraux ou autres sources de nutriments, et sont importants dans l'évaluation de la fertilité des sols et des taux d'application d'engrais requis.

Estimez le rendement des cultures plantées dans les champs proches de la maison, dans les champs éloignés et dans des champs de brousse. Comparez les rendements obtenus dans les champs des agriculteurs avec le rendement réalisable pour les différentes cultures cultivées sans contraintes de nutriments. Cela peut se faire par référence aux résultats des essais agronomiques, si disponibles, ou aux meilleurs rendements obtenus au cours des dernières années dans la région concernée. Les écarts de rendement donnent une indication du potentiel d'amélioration des rendements et de la production agricole en introduisant les pratiques de la GIFS.

5.3.3 Fréquence et calendrier des visites

Comme évoqué ci-dessus, une seule visite donne souvent une vue déformée ou déséquilibrée de la croissance des cultures dans une exploitation donnée. Les vulgarisateurs doivent donc effectuer plusieurs inspections des exploitations sélectionnées au sein d'un terroir donné au cours d'une campagne agricole, afin d'obtenir des informations fiables concernant les effets de la fertilité des sols sur la production agricole.

Programmez les inspections de manière à coïncider avec les périodes essentielles de la croissance des cultures. Par exemple, les contraintes de la fertilité des sols sont indiquées, si le maïs planté dans les sols suffisamment humides est rabougri un mois après le semis.

5.3.4 Tenue des registres agricoles

Les données sur la fertilité des sols et les rendements des cultures sont rarement disponibles. Pourtant ce sont des informations indirectes extrêmement utiles pour l'évaluation de la fertilité des sols. Au niveau du terroir, un registre tenu par les chefs du village dans lequel ils inscrivent les rendements des cultures, fournit des informations utiles sur la variabilité des rendements enregistrés dans les exploitations au cours des saisons et des années.

Un système de culture est la disposition des cultures dans un champ donné, plantées suivant un arrangement spatial et temporel et des pratiques agronomiques.

5.3.5 Utilisation d'un calendrier cultural

Un calendrier cultural devrait être établi pour indiquer les principaux événements (c'est-à-dire les dates de semis, d'application d'engrais et de récolte) pour chaque type de culture dans chaque système de culture qu'on trouve dans la zone visée par l'étude. Les calendriers culturaux devraient être préparés en étroite collaboration avec les agriculteurs et ils sont importants pour prendre en compte les variations parmi les agriculteurs en ce qui concerne la programmation d'événements précis.

L'objectif est de documenter les pratiques comme une première étape dans l'identification des points d'entrée possibles par lesquels des techniques améliorées peuvent être introduites. Par exemple, un calendrier cultural pour une céréale peut révéler des possibilités d'améliorer l'efficacité de l'utilisation d'engrais azotés en programmant leur application de manière à coïncider avec des périodes de grande demande en nutriments des cultures.

5.3.6 Utilisation d'une budgétisation participative

Les agents de terrain ont constaté qu'au lieu de préparer un budget d'une culture ou d'une entreprise *pour* les agriculteurs, il est mieux de travailler avec eux (Figures 5.2 et 5.3). La budgétisation dite participative est utilisée pour identifier et quantifier l'utilisation d'intrants et la production de produits pour une entreprise sur une période donnée. Cette méthode peut également être utilisée pour étudier l'impact de l'introduction de la GIFS et d'en comparer les différentes options.

Cette méthode est basée sur un jeu de société africain parfois appelé *Bao*, *Awari* ou *Mancala*. En utilisant une planche de jeu ou une grille, ou des trous dans le sol et des semences ou de petits cailloux, les agriculteurs indiquent différentes activités en plaçant les symboles dans les trous et en indiquant les quantités de ressources utilisées ou requises avec les compteurs. Par exemple, la main-d'œuvre utilisée par différentes entreprises agricoles peut être quantifiée ou le budget d'une entreprise établi.

5.4 Évaluation de la fertilité des sols

La fertilité des sols comme terme général est traitée dans la Section 6.4 et les méthodes d'échantillonnage des sols sont décrites dans la Section 7.2. Les valeurs essentielles pour certaines propriétés physiques et chimiques des sols des collines sont indiquées dans la Section 7.

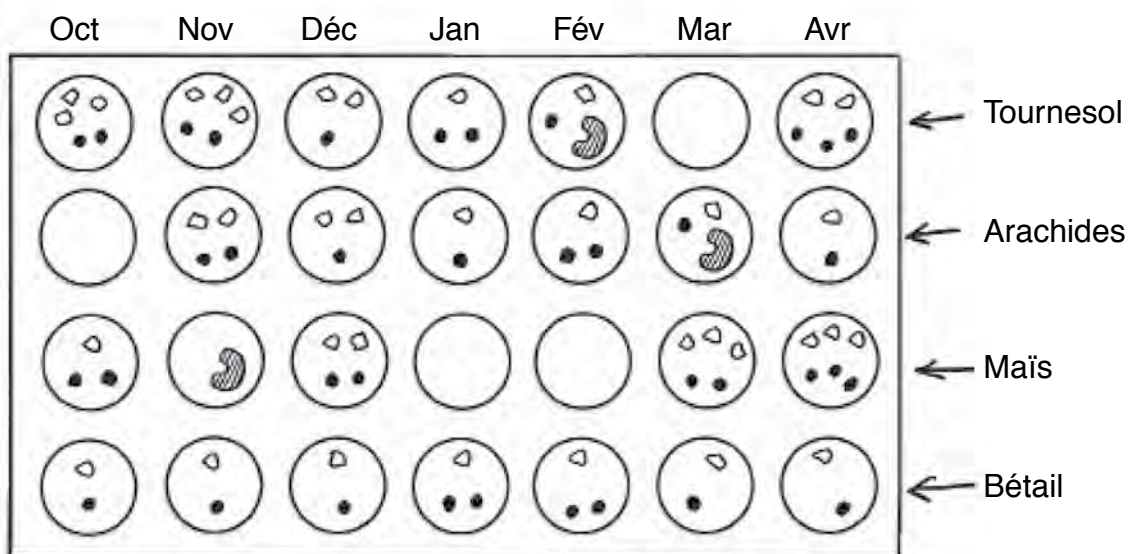
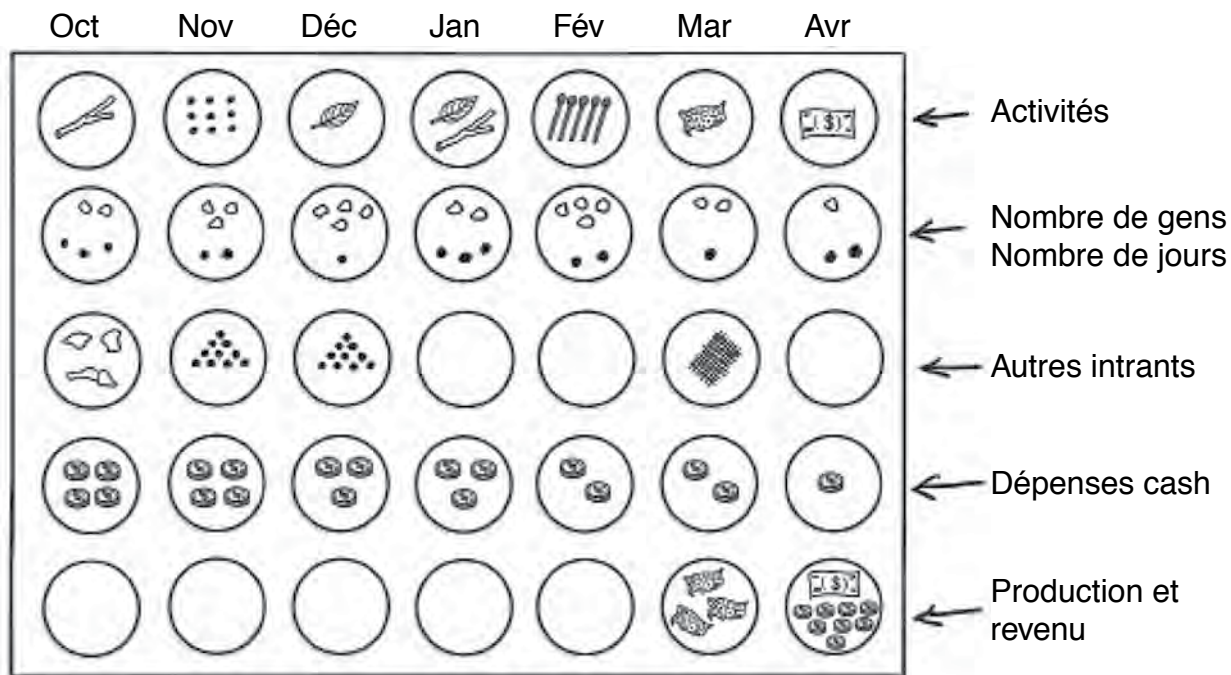
Un sol "fertile" possède les caractéristiques suivantes:

- Un apport adéquat de macronutriments, à savoir: l'azote (N), le phosphore (P), le potassium (K), le magnésium (Mg), le calcium (Ca) et le soufre (S), et d'oligoéléments, dont le bore (B), le cuivre (Cu), le fer (Fe), le manganèse (Mn), le molybdène (Mo), le chlore (Cl), le cobalt (Co) et le zinc (Zn), est nécessaire pour soutenir la production de rendements de cultures économiques à long terme.
- Les stocks de nutriments sont reconstitués par le recyclage des résidus de cultures, l'ajout de déjections animales, de compost, d'engrais minéraux et la fixation biologique de l'azote par les légumineuses.
- La matière organique suffisante est retournée au sol grâce à l'ajout de racines, de résidus de cultures et de déjections animales pour soutenir la matière organique du sol, ce qui contribue à une bonne structure du sol ainsi qu'à la capacité de stockage des éléments nutritifs et de l'humidité.

5.4.1 Flux de ressources entre les exploitations agricoles et à l'intérieur de celles-ci

L'équipe FSA devrait effectuer une analyse de la circulation des produits agricoles, des résidus de cultures et du fumier animal entre les champs et entre les exploitations avec une attention particulière aux éléments ci-après:

- le mouvement de résidus de cultures entre les champs (par exemple, l'utilisation de résidus de cultures provenant des champs proches de la maison dans des champs éloignés) et les exploitations agricoles (par exemple, vente de résidus de récolte par l'agriculteur sans bétail à un agriculteur-éleveur);
- le mouvement du fumier animal entre les champs et les exploitations (par exemple, la vente de fumier animal par l'agriculteur-éleveur à un agriculteur sans bétail);



- = Nombre de personnes
- = Nombre de jours
- = Traction animale

Figure 5.2 Budget de ressources pour la main-d'œuvre allouée aux différentes cultures.

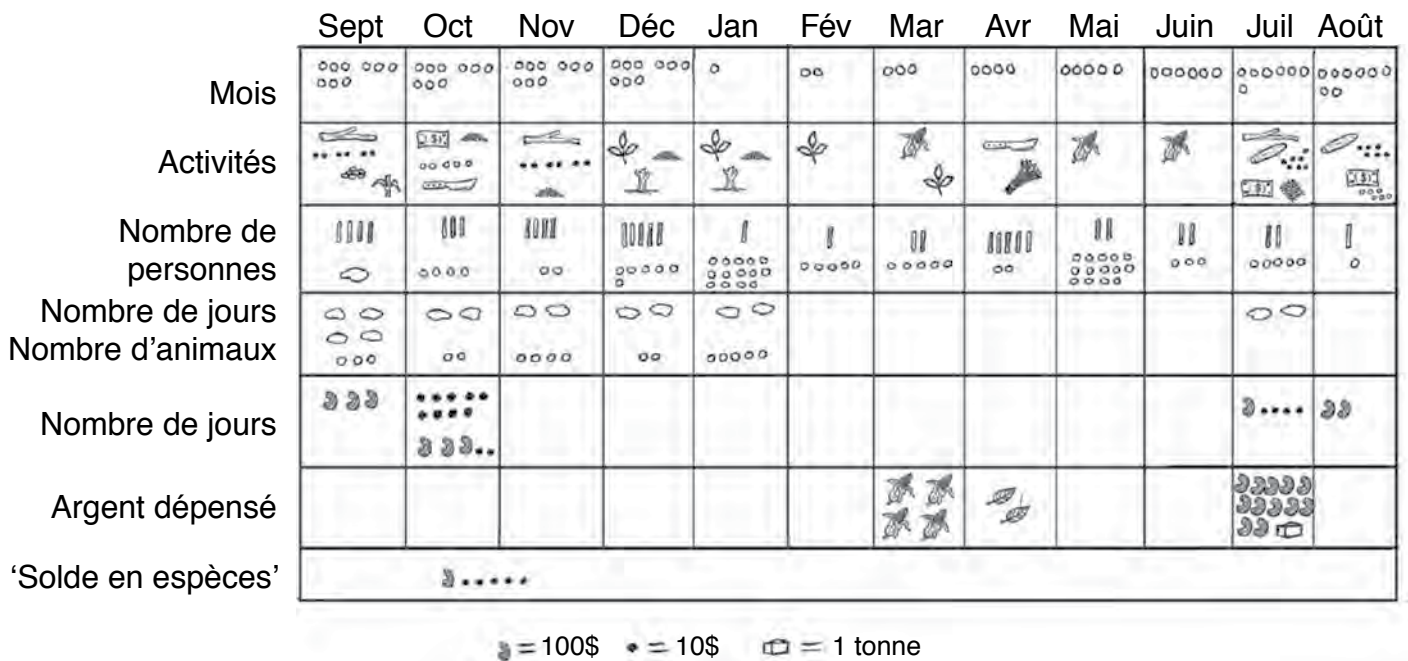


Figure 5.3 Un budget participatif préparé par des paysannes au Zimbabwe montre la production et les intrants pour 1 ha de maïs. Des symboles et des compteurs ont été utilisés pour préparer ce budget.

- l'utilisation des produits agricoles pour la sécurité alimentaire ou pour la vente;
- l'application de quantités correctives de chaux où un faible taux d'acidité est accompagné de toxicité en aluminium (Al) et les cultures sensibles à la toxicité en Al font partie de la rotation du système de culture;
- un drainage suffisant pour retirer l'excès d'eau tout en conservant suffisamment d'humidité pour une croissance sans entrave de la culture;
- des structures de conservation du sol appropriées afin de réduire au minimum la perte de sol et de nutriments due à l'érosion et aux eaux de ruissellement; et
- le P disponible >20 mg/kg, le K échangeable >0,20 cmol/kg.

Un *sol peu fertile* peut tout simplement manquer de nutriments suffisants pour soutenir la croissance des cultures ou il peut être dégradé de telle sorte que la partie supérieure du sol ait été perdue, la matière organique du sol appauvrie, la structure du sol effondrée, et les cultures sur les sols dégradés ne répondent pas à l'application d'engrais minéraux.

Il est important de faire une distinction entre la comparaison de la fertilité de différents types de sols (par exemple, les sols sablonneux à texture légère par rapport aux sols argileux à texture lourde) et la comparaison de la *fertilité* des sols dans les différents champs et exploitations avec le même type de sol. Ainsi, alors que la classification des sols fournit des informations utiles sur les propriétés générales, les stocks de nutriments actuels et la fertilité du sol dépendent de la gestion récente et passée.

Une distinction peut également être faite entre les sols qui sont intrinsèquement stériles (c'est-à-dire qu'ils étaient stériles avant d'être mis en culture, avec de faibles stocks de nutriments ou des propriétés inhérentes non propices à la croissance des cultures) et les sols qui *étaient* fertiles, mais sont devenus moins fertiles après une culture répétée, souvent en raison d'une mauvaise gestion de la fertilité pédologique et au manque de reconstitution des nutriments dans le sol.

La fertilité du sol augmente généralement ou s'améliore au fil du temps quand les bonnes pratiques de GIFS sont mises en œuvre à moyen terme (5–10 ans).

Les agriculteurs ont généralement trois différents types de terres:

- les champs “fertiles” près de la maison du paysan qui reçoivent du fumier et de l’engrais organique régulièrement;
- les champs “moins fertiles” éloignés de la maison du paysan souvent continuellement cultivés sans apport d’éléments nutritifs additionnels; et
- les «champs de brousse» se trouvant encore plus loin des maisons et plus fertiles que ceux de la deuxième catégorie parce que la culture y est moins intense.

L’élément important ici est la façon dont les différences entre la fertilité des sols au sein des exploitations, entre les exploitations, et à travers les systèmes d’exploitation agricole affectent l’efficacité agronomique de l’utilisation de l’engrais et du fumier, et ainsi les recommandations d’engrais qui conduisent à d’importantes rétroactions au sein du système.

Il est important d’évaluer la productivité des cultures et les flux de ressources (résidus de cultures, aliments pour bétail, fumier animal, engrais) pour chaque type de terrain. Cela aidera les vulgarisateurs à identifier les points d’entrée pour l’amélioration agronomique et à hiérarchiser les domaines au sein du système d’exploitation agricole qui devraient faire l’objet d’amélioration.

Il existe de nombreux indices de fertilité des sols, à la fois directs et indirects, qui sont évidents pour le visiteur attentif. Le bien-être de l’agriculteur et de sa famille (santé, nutrition, tenue vestimentaire, possessions) fournit d’utiles indices indirects, au même titre que la grandeur de ses greniers. Les agriculteurs qui dépendent de l’agriculture pour leur subsistance et ont atteint un bon niveau de prospérité sont susceptibles d’exploiter des “sols fertiles”.

5.4.2 Symptômes de déficience

Les symptômes visibles sur les feuilles des plantes peuvent fournir une indication de graves déficiences en nutriments en raison de la mauvaise qualité des sols. Le maïs (Photo 4.13), comme de nombreuses autres cultures, présente des symptômes évidents de déficience sur les feuilles. Les cultures sont souvent rabougries là où il y a une carence en éléments nutritifs, en particulier le phosphore (Photo 4.17).

5.4.3 Plantes révélatrices

Certaines plantes, par leur présence, sont révélatrices de la faible fertilité du sol ou des problèmes de fertilité du sol (par exemple, une faible présence d’éléments nutritifs dans le sol, la toxicité en Al, le mauvais drainage).

5.4.4 Echantillonnage des sols

L’échantillonnage et l’analyse des sols peuvent fournir des informations très utiles sur leur fertilité à condition que l’échantillonnage soit effectué correctement (Section 7.2). Les échantillons doivent être prélevés sur la tranche supérieure de 20 cm du sol, parce que c’est la zone où la plupart des racines nourricières des cultures se trouvent.

Lors de l’échantillonnage des sols dans une ferme, il est important de prendre en compte les gradients de la fertilité des sols au sein et entre les champs. Des échantillons composites distincts devraient être prélevés dans chaque champ au sein d’une même ferme où il y a des preuves de gradients de fertilité des sols entre les champs en fonction des différences dans la croissance des cultures et de leur apparence, et peut-être dans l’apparence du sol lui-même.

Il est également important d’étudier la variabilité de la fertilité des sols entre 5 et 10 exploitations au sein d’un terroir et entre les champs proches de la maison du paysan, les champs éloignés de la maison et les champs de

brousse au sein des mêmes exploitations. Cela fournira des informations utiles lors de la définition de la gamme de recommandations d'engrais.

Prélevez les échantillons de sols qui n'ont pas été cultivés et comparez leurs propriétés avec les sols cultivés échantillonnés, peut aider à clarifier la mesure dans laquelle les pratiques actuelles des agriculteurs dégradent, maintiennent, ou améliorent la fertilité des sols.

Une tarière doit toujours être utilisée pour prélever des échantillons du sol pour que la profondeur des sols échantillonnés soit la même dans chaque échantillon (Photo 7.3). Un échantillon composite représentatif doit être préparé pour chaque champ en mélangeant plusieurs échantillons à la tarière, prélevés à la même profondeur et à des positions différentes dans le champ concerné.

L'évaluation de la fertilité des sols permet de révéler le potentiel d'augmentation des rendements et de réduction des écarts de rendement dans un terroir. Lorsque les rendements sont augmentés, la nécessité d'élargir la zone de production pour répondre aux besoins alimentaires actuels est atténuée. De cette manière, il peut être possible de réserver des terres agricoles pour d'autres usages.

L'agriculture durable exige que la capacité du sol à produire des cultures ne baisse pas à moyen et à long terme. Des évaluations périodiques de la fertilité des sols contribuent donc à déterminer si les pratiques de l'agriculteur mènent à une gestion durable des terres.

Un faible pH est souvent considéré comme un facteur limitant la production agricole. Toutefois, cela n'est généralement valable que là où les cultures sensibles à un faible pH sont cultivées (par exemple, le coton) ou si un faible pH est lié à la toxicité en aluminium et les cultures sensibles à la toxicité en aluminium sont incluses dans le système de culture ou dans la rotation.

La quantité de matière organique du sol dans un sol est généralement très fortement liée à la texture ou la teneur du sol en argile. Les sols pauvres en argile ont tendance à contenir moins de matière organique et offrent moins de possibilités d'en augmenter la quantité.

Les évaluations des changements de la matière organique du sol au fil du temps peuvent donner de fausses informations, à moins que la quantité de la matière organique soit corrigée pour tenir compte d'éventuelles modifications de la densité apparente du sol.

La portion argileuse des sols acides hautement dégradés est généralement dominée par les minéraux argileux kaoliniques 1/1 et les oxydes d'Al et de Fe. En conséquence, ces sols ont tendance à avoir une faible capacité à stocker les nutriments (c'est-à-dire une faible capacité d'échange de cations). Les sols contenant plus de 35% d'argile dominée par les oxydes de Fe et/ou d'Al peuvent avoir une forte capacité à adsorber P et donc à réduire la disponibilité de P assimilable exportable par les cultures.

Analyse du sol et interprétation des données

Les résultats des analyses du sol peuvent fournir des informations très trompeuses si les procédures de laboratoire ne sont pas effectuées correctement. Par conséquent, il est toujours prudent de soumettre des échantillons témoins pour vérifier si le laboratoire concerné est en mesure de déterminer les valeurs cohérentes des principales propriétés physico-chimiques du sol.

La texture du sol peut être déterminée en laboratoire (ce qui est généralement très coûteux) ou en utilisant la procédure du "test au toucher" directement dans le champ. Le pH du sol peut être déterminé avec assez de précision dans le champ en utilisant un pH-mètre portable (par ex.: Pehameter®) (Photo 7.1).

Les "valeurs critiques" pour les principaux paramètres des sols sont des indications approximatives au mieux des besoins en engrais. Par exemple, le N total dans le sol ne révèle pas beaucoup de renseignements utiles sur la disponibilité de N pour les cultures dans une saison donnée, mais une analyse du P disponible et du K échangeable peut donner une bonne indication pour savoir si le sol est en mesure de fournir des quantités suffisantes de ces nutriments pour la croissance des cultures.

5.5 Marchés et facteurs socio-économiques

Lors de l'identification des terroirs appropriés pour promouvoir la GIFS, l'attention tend à être portée sur les facteurs biophysiques abordés en termes, par exemple, de paysage, de types de sol, de climat, et de types de systèmes de culture et d'élevage. Souvent, on accorde peu d'attention aux facteurs socio-économiques et aux facteurs liés aux politiques qui pourraient avoir une incidence sur la capacité des agriculteurs d'un terroir sélectionné à adopter les pratiques de GIFS. Dans cette section, nous abordons les types d'informations socio-économiques et politiques qui devraient être incluses dans les analyses des systèmes d'exploitation agricoles et des systèmes de culture, et qui contribuent au choix du terroir.

Il est nécessaire de disposer d'informations au sujet des investissements et politiques gouvernementaux, des performances du marché et des facteurs socio-économiques au niveau de l'exploitation qui pourraient influencer sur l'adoption de la GIFS. Ces informations ne sont pas seulement importantes pour la sélection du terroir, mais elles seront également utiles lors de la sélection des composantes techniques et socio-économiques spécifiques d'un programme de GIFS.

5.5.1 Environnement politique et rôle des gouvernements

Les gouvernements peuvent jouer un rôle important dans la promotion de l'adoption des pratiques de GIFS directement, grâce à des programmes de diffusion d'informations visant à aider les agriculteurs GIFS à prendre de bonnes décisions en matière de production et de commercialisation, ou grâce à des subventions qui rendent l'adoption moins coûteuse.

Les gouvernements peuvent aussi aider indirectement grâce à des investissements dans les infrastructures routières, l'irrigation, la recherche et le développement. Dans certains cas, néanmoins, le gouvernement peut également entraver l'expansion de la GIFS en maintenant en place des politiques de nature à freiner le développement des marchés des intrants et des produits agricoles ou en faisant des investissements insuffisants dans les biens publics, tels que la vulgarisation, l'éducation, le contrôle de la qualité des intrants, et les qualités et normes pour les cultures vivrières commercialisées.

Nous allons maintenant examiner certaines des questions de politiques gouvernementales qui devraient être prises en considération par rapport au travail de gestion de la fertilité des sols.

Les subventions agricoles

L'équipe d'évaluation doit examiner les questions suivantes:

- Quelles subventions sont-elles en place ou prévues?
- Quels sont les groupes cibles?
- Quelles sont les cultures et les zones les plus susceptibles d'être touchées?
- Y a-t-il des projets relatifs à l'amélioration des marchés de produits agricoles où l'offre de produits est susceptible d'augmenter à la suite des subventions?
- Les personnes des zones ciblées sont-elles susceptibles d'être les mêmes que celles qui seront impliquées dans des programmes GIFS? Dans l'affirmative, les subventions sont-elles susceptibles de favoriser ou de décourager l'adoption des pratiques de GIFS?
- Les subventions sont-elles susceptibles de favoriser ou de décourager le développement des marchés des intrants et des produits?

Lorsque les programmes de subventions de l'Etat sont sous-financés ou les quantités qui font l'objet de subventions changent d'année en année, l'incertitude créée sur le marché pour les détaillants du secteur privé

peut être importante, réduisant leur capacité à approvisionner les agriculteurs GIFS en temps opportun. L'équipe d'évaluation des systèmes d'exploitation agricole doit chercher à savoir si les subventions sont susceptibles de se poursuivre et, si ce n'est pas le cas, quelles seraient les répercussions probables sur le programme GIFS envisagé.

Connaissances sur la GIFS

L'équipe d'évaluation des systèmes d'exploitation agricole doit examiner les questions suivantes:

- Quel est le rôle joué par le gouvernement en faveur de la création (grâce à la recherche) et de la diffusion (à travers la vulgarisation) des connaissances sur la GIFS?
- D'autres acteurs (par exemple, groupes d'agriculteurs, ONG, fournisseurs d'intrants) contribuent-ils également?
- Y a-t-il une coordination suffisante entre les efforts du gouvernement et ceux du secteur privé?
- Quel est l'impact du niveau actuel d'activités en matière de création/diffusion des connaissances GIFS sur le travail dans les terroirs ciblés?

Informations sur le marché et le contrôle de la qualité

L'équipe d'évaluation des systèmes d'exploitation doit examiner les questions suivantes:

- Les agriculteurs et les commerçants dans cette zone ont-ils accès aux informations opportunes et précises sur les prix des intrants et des produits? Si ce n'est pas le cas, comment le flux d'informations pourrait-il être amélioré?
- Y a-t-il une série de données de prix dans le temps à la disposition des chercheurs et des vulgarisateurs qui veulent analyser les changements de la rentabilité des pratiques GIFS au fil du temps?
- Les agriculteurs sont-ils satisfaits de la qualité des intrants commercialisés ou y a-t-il un sentiment que les contrefaçons ou les produits de mauvaise qualité sont un problème majeur?
- Y a-t-il un besoin d'améliorer les réglementations ou l'application des réglementations existantes relatives à la qualité, aux types et aux normes d'intrants agricoles?
- Les mauvaises informations de marché ou un mauvais contrôle de la qualité compromettent-ils l'expansion du programme GIFS dans les terroirs ciblés? Dans l'affirmative, qu'est-ce qui peut être fait pour améliorer la situation?

Les infrastructures

Les investissements routiers sont un "bien public" parce qu'ils permettent un meilleur fonctionnement des marchés des intrants et des produits, en réduisant les coûts de transport et les problèmes rencontrés par les agriculteurs quant à l'acheminement des intrants dans leurs champs et des produits aux acheteurs.

- Le réseau routier dans les domaines visés est-il si mauvais qu'il pourrait entraver gravement l'adoption de la GIFS?

Les coûts de transport devraient être calculés à la fois en termes de dollars par tonne (le coût de production de l'agriculteur) et en dollars par tonne-kilomètre (une mesure de l'efficacité du transport). Par exemple, au tableau 5.1 le coût du transport de la même quantité d'engrais à l'endroit 2 est plus coûteux à l'agriculteur (en \$ /t) mais moins coûteux, en termes d'efficacité (en \$ /t km) par rapport à l'endroit 1. Le coût par tonne-kilomètre peut être plus élevé à l'endroit 1 en raison du mauvais état des routes.

L'évaluation du coût par tonne-kilomètre du transport des engrais jusqu'aux agriculteurs en provenance du plus proche grossiste ou le coût par tonne-kilomètre d'acheminer les produits agricoles au moment de la récolte dans les différentes zones envisagées pour des interventions GIFS peut améliorer le choix de l'endroit.

Les politiques foncières

Certains programmes GIFS peuvent requérir des investissements considérables en main-d'œuvre et en capitaux pour la restauration de la fertilité des sols ou la lutte contre l'érosion. Avant de sélectionner les terroirs pour ce type de programme, il sera nécessaire de comprendre la situation sur le plan foncier, y compris la législation foncière et la façon dont les agriculteurs la perçoivent.

- Est-ce que les agriculteurs pensent que le gouvernement ou le chef local peut prendre leurs terres, ou est-ce qu'ils croient qu'ils sont les seuls propriétaires ayant le contrôle total des terres qu'ils cultivent, avec le plein droit de les vendre ou les léguer à leurs enfants?
- Est-ce que les agriculteurs se sentent en sécurité dans la gestion foncière des terres, comment les lois et pratiques coutumières sont-elles à la base de l'insécurité foncière et comment ce problème peut-il être résolu?

Sans la résolution de ces questions, les programmes GIFS et leurs clients agriculteurs seraient peu disposés à se concentrer sur les processus de reconstruction du capital du sol ou de réduction de l'érosion qui sont coûteux mais avec des retombées lentes.

5.5.2 Les marchés

Les principaux marchés d'intérêt pour l'adoption de la GIFS sont les marchés des intrants, du crédit, de la main-d'œuvre et des produits.

Le marché des intrants

Un constat sous-jacent et scientifiquement prouvé de la gestion intégrée de la fertilité des sols en Afrique subsaharienne est que l'utilisation d'engrais de synthèse et de germoplasme amélioré doit progresser pour le maintien du capital du sol et l'accroissement de la productivité des cultures. Cela signifie que l'adoption de la GIFS pourrait être compromise par un mauvais fonctionnement des marchés des intrants et des produits. Il est essentiel que les intrants soient disponibles sur les marchés locaux au moment opportun et à des prix abordables.

Les terroirs ayant des performances médiocres ou sans marchés des intrants ne devraient pas être évités, mais il sera indispensable que les projets et programmes intègrent des activités de développement des marchés. Au cours du processus de prise de décisions concernant les terroirs, un inventaire et une évaluation préliminaires du secteur de vente des intrants dans la zone géographique visée devraient poser les types de questions ci-après:

- Les détaillants sont-ils situés assez près des agriculteurs pour que le transport ne soit pas une contrainte? ("assez près" variera en fonction des routes, des types de transport utilisés par les agriculteurs pour aller au marché) Cette évaluation peut nécessiter une discussion avec les agriculteurs pour voir dans quelle mesure ils sont disposés à se déplacer pour acheter différents types d'intrants et quels sont les coûts impliqués. Le calcul et la comparaison des coûts de transport (en \$ /t) et l'efficacité du transport (en \$ /t km) sont des indicateurs utiles (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 Exemple d'une comparaison des frais de transport de l'engrais vers deux lieux.

Paramètre	Unités	Ligne	Lieu 1	Lieu 2
Quantité de matériel transporté	tonnes	a	3.5	3.5
Distance couverte	km	b	25	70
Coût total du transport	\$	c	30	50
Coût du transport	\$/t	$c \div a$	8.6	14.3
	\$/t km	$c \div a \div b$	0.3	0.2

Dans certaines situations, les agriculteurs peuvent préférer l'achat des intrants sur des marchés plus éloignés si la marge bénéficiaire du fournisseur local est plus élevée que le coût de se rendre à un lieu plus éloigné. Si les détaillants ne sont pas à proximité, les options pour résoudre le problème sont les suivantes:

- les programmes peuvent aider les marchands locaux à ajouter les intrants sur la liste des produits qu'ils vendent;
 - fournir des incitations à des fournisseurs plus éloignés pour ouvrir un magasin local; et
 - travailler avec des organisations paysannes pour consolider les commandes des membres et organiser des achats groupés, afin de réduire les coûts de transport et de transaction.
- Les détaillants sont-ils expérimentés et fiables (stockent-ils les produits correctement, peuvent-ils donner des conseils aux agriculteurs sur l'utilisation des produits, ont-ils établi des relations avec leurs fournisseurs qui garantissent une qualité uniforme et évitent des ruptures de stock, sont-ils entravés par le manque de crédits, leur système de tarification est-il uniforme et transparent)? Pour ce faire, il faudra organiser des visites auprès de différents détaillants locaux et des entrevues avec leur personnel de vente ainsi qu'avec leurs fournisseurs, afin de s'assurer que l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement est "en bonne santé". Si ce n'est pas le cas, un programme de formation des distributeurs devra probablement être inclus comme composante du programme GIFS.
 - Les dimensions des sacs vendus sont-elles adaptées à la capacité des agriculteurs à les acheter? Beaucoup de petits agriculteurs préfèrent acheter des engrais en petits sacs de 20–25 kg au lieu des sacs standard de 50 kg.
 - Si les dimensions ne sont pas appropriées, qu'est-ce qui peut être fait pour améliorer la situation? Dans certains pays, il existe des lois interdisant aux détaillants de réemballer les engrais et les semences pour éviter l'altération de produits. Dans de tels cas, les fabricants ou les distributeurs majeurs devront être encouragés pour emballer leurs produits dans de petits sacs ou le programme aura besoin de faire du lobbying pour obtenir des changements dans la législation, les deux approches prennent du temps pour donner des résultats.
 - Les types d'engrais disponibles sont-ils les plus rentables (les engrais dotés de plus de nutriments sont généralement plus coûteux par kilogramme mais moins chers par kilogramme de nutriments)? Si ce n'est pas le cas, quelle est la contrainte pour avoir sur le marché des produits qui présentent un meilleur rapport coût-efficacité? Dans certains pays, seul un nombre limité d'engrais composés sont approuvés pour la vente, l'institut national de recherche agronomique ou un organe similaire étant chargé de la régulation. Dans de tels cas, le programme aura à travailler avec les institutions de régulation pour évaluer les avantages et les inconvénients d'allonger la liste des produits acceptables pour mieux servir les agriculteurs.
 - Les semences améliorées (certifiées, variétés à pollinisation libre, hybrides) sont-elles disponibles dans la zone? Si non, pourquoi ne sont-elles pas disponibles? Y-a-t-il des limites réglementaires quant à ce qui est disponible? Certains pays continuent à interdire l'utilisation de semences hybrides et beaucoup d'autres ne permettent pas l'utilisation de semences OGM (organismes génétiquement modifiés). Quels types de mesures seraient nécessaires pour encourager les détaillants à vendre des semences améliorées et les agriculteurs à les acheter?
 - Les recommandations GIFS sont-elles susceptibles d'inclure l'utilisation des pesticides? Si oui, quelles sont les pesticides disponibles sur le marché local ?
 - Existe-t-il des procédures en place pour s'assurer que les pesticides sont de bonne qualité et que les détaillants sont en mesure de donner aux paysans des informations sur leur bonne utilisation? Si non, qu'est-ce qui peut être fait pour améliorer la situation?

Les marchés du crédit

La GIFS reconnaît le rôle important des engrais minéraux dans le renforcement et le maintien de la fertilité des sols. Néanmoins, si le prix local des intrants recommandés par la GIFS dépasse la capacité de la plupart des agriculteurs à payer au comptant, le crédit sera important. À ce stade du processus GIFS, les analystes n'auront pas une compréhension précise des besoins en crédit parce que certains éléments du programme GIFS n'auront toujours pas été identifiés. En l'absence d'informations plus spécifiques, l'analyste peut supposer que la majorité des agriculteurs auront besoin de crédit, dans une certaine mesure, pour acheter des engrais.

Pour évaluer la disponibilité du crédit, l'équipe FSA doit identifier les diverses sources, comprendre comment elles ont été utilisées dans le passé, et poser des questions pertinentes sur la façon dont elles pourraient être adaptées aux besoins des agriculteurs GIFS.

Nous allons maintenant examiner quatre sources de crédit qui pourraient intéresser les programmes GIFS.

Les commerçants locaux ou détaillants d'intrants

Si les détaillants d'intrants sont également impliqués dans l'achat et le commerce des produits agricoles (une situation courante dans certains pays), ils peuvent être plus disposés à offrir des facilités de crédit que ce soit pour les intrants ou pour l'achat de vivres pendant la saison de culture (fréquemment remboursables en nature après la récolte). La disponibilité du crédit pour l'achat de denrées alimentaires de base peut améliorer la trésorerie du paysan, lui permettant ainsi d'acheter quelques intrants.

Les programmes gouvernementaux de crédit

Les programmes de crédit gouvernementaux sont souvent caractérisés par des changements de politiques et la politisation de ceux qui ont accès au crédit. En outre, il y a souvent un manque de sanctions claires imposées pour le défaut de paiement, conduisant à une perte de capital et la fermeture du programme de crédit. Si l'adoption de la GIFS risque de dépendre de la disponibilité du crédit dans les zones où les programmes gouvernementaux n'ont pas eu un bon précédent, il serait nécessaire de travailler avec le gouvernement en vue d'améliorer les programmes ou de trouver des alternatives.

Les programmes de microfinance

La microfinance est de plus en plus utilisée pour financer l'achat d'intrants agricoles, mais elle est souvent limitée par les petits montants qui peuvent être empruntés et les courtes périodes avant le début de remboursement du prêt. Les taux d'intérêt ont tendance à être élevés (30%), en comparaison avec d'autres sources de crédit (10–15% pour les programmes gouvernementaux).

La filière intégrée - contrats pour les intrants/produits

Dans une filière intégrée, le commerçant ou l'entreprise qui envisage d'acheter les produits d'un agriculteur est disposé à fournir des intrants à crédit et percevoir le remboursement lorsque l'agriculteur vendra sa récolte. Afin d'obtenir un crédit pour intrants, l'agriculteur doit signer un contrat acceptant de vendre une quantité spécifiée de sa production au commerçant ou à l'entreprise offrant le crédit. Ces pratiques font souvent partie des dispositions des contrats de production agricole ou agriculture contractuelle.

Cet arrangement semble être la meilleure option pour les agriculteurs qui produisent pour le marché, mais ils se heurtent à des problèmes de non-respect des obligations contractuelles, lorsqu'ils ne sont pas bien organisés ou lorsqu'ils sont peu disposés à sanctionner leurs voisins qui n'honorent pas leurs contrats. L'approche de la filière est beaucoup plus facile à mettre en œuvre pour les cultures spécialisées sans autres options de vente locale et beaucoup plus difficile à mettre en œuvre pour les denrées locales, telles que les céréales.

Pour évaluer adéquatement la disponibilité du crédit dans les terroirs visés, l'équipe FSA doit avoir des entretiens tant avec les fournisseurs de crédit qu'avec leurs clients pour obtenir des informations complètes sur le

fonctionnement des systèmes de crédit et leur potentiel pour servir les agriculteurs GIFS. Il faudrait recueillir des informations sur:

- les montants minimum/maximum des prêts;
- la durée typique des prêts;
- les taux d'intérêt;
- les méthodes de remboursement (c'est-à-dire si les paiements sont effectués en espèces ou en nature);
- les taux de remboursement; et
- les dispositions prises pour le rééchelonnement des prêts en cas de mauvaises récoltes.

L'assurance-récolte

Les programmes d'assurance-récolte pourraient être disponibles localement. De tels programmes devraient être évalués par rapport à l'incidence de la sécheresse et la probabilité de retards des pluies. En d'autres termes, si les primes d'assurance sont avantageuses pour l'agriculteur.

Les marchés de la main-d'œuvre

Certaines pratiques GIFS nécessitent une augmentation de la main-d'œuvre pendant les périodes de pointe et/ou le recours à certains services auprès des propriétaires d'équipements mécanisés pour certaines tâches (labour, battage). Si un agriculteur a une main-d'œuvre familiale sous-utilisée et du matériel nécessaire, il n'y a pas de problème. Si ce n'est pas le cas, il doit y avoir un marché efficace, où les travailleurs temporaires et les services nécessaires peuvent être loués ou, comme dans de nombreux pays, un système communautaire de groupes de travail qui se déplacent d'une exploitation à une autre. Le travail dans les champs d'un participant est effectué en échange de travaux effectués par le participant dans les champs des autres membres du groupe.

Beaucoup de pratiques GIFS nécessitent un accroissement important de la main-d'œuvre pendant les périodes creuses (par exemple, le compostage, la collecte et l'application du fumier, la construction d'ouvrages anti-érosifs, les techniques spéciales de travail du sol pour améliorer la capacité de rétention de l'humidité). Les promoteurs de la GIFS supposent souvent qu'une augmentation des besoins de main-d'œuvre pose peu de problèmes pour les agriculteurs. Cela n'est pas toujours le cas, étant donné que les agriculteurs s'engagent souvent dans d'autres activités génératrices de revenus (la migration, l'emploi non agricole ou les activités de travail indépendant) durant les périodes creuses. Cela signifie que dans l'évaluation des incitations économiques pour qu'un agriculteur adopte un ensemble de pratiques GIFS, nous avons besoin de connaître le coût d'opportunité de la main-d'œuvre de l'agriculteur.

Le coût d'opportunité de la main-d'œuvre supplémentaire utilisée dans la GIFS est la perte de revenus provenant d'une autre activité que l'agriculteur aurait pu entreprendre au cours de cette période.

Alors que le coût d'opportunité variera d'un agriculteur à l'autre, une référence commune pour l'estimer serait le salaire moyen d'un journalier en agriculture ou pour des activités non agricoles menées en dehors de la saison de pointe.

Marchés des produits

Les agriculteurs auront besoin de revenus en espèces pour payer les intrants achetés qui doivent être utilisés dans le cadre des pratiques GIFS. À moins que l'exploitation agricole familiale ait d'autres importantes sources de revenus d'élevage ou d'autres activités non agricoles, cela signifie produire au moins quelques produits agricoles à vendre sur le marché.

En décidant du terroir où le programme GIFS sera mis en œuvre et des systèmes de culture à cibler, une attention particulière doit être accordée au fonctionnement des marchés des produits. L'équipe FSA doit examiner les questions suivantes:

- Y a-t-il une demande forte et croissante pour les produits cultivés dans le terroir cible?
- Quelle est la structure actuelle du système de commercialisation? (plusieurs acteurs et à des prix compétitifs/ peu d'acteurs et des prix défavorables aux agriculteurs/un rôle établi pour les organisations de producteurs dans le cadre de la collecte et de la consolidation de la production pour les prochaines ventes)
- Quel est le rôle du gouvernement? (participation directe en matière d'achats et de ventes/rôle réglementaire en termes de qualités et de normes, tarifs d'importation/exportation et subventions ou politiques de soutien des prix)
- Y a-t-il des filières bien développées qui pourraient servir de levier pour l'introduction de pratiques GIFS dans un système d'exploitation agricole qui a déjà des infrastructures de commercialisation fiables?
- Y a-t-il des possibilités de rendre les marchés plus efficaces de manière à réduire les coûts de transaction et les marges bénéficiaires, présentant ainsi des opportunités d'augmenter les prix à la production et/ou de réduire les prix à la consommation?

Une analyse de toutes les informations recueillies sur les activités du gouvernement et des marchés doit:

- identifier les principales possibilités et facteurs limitatifs à l'adoption et l'utilisation continue des pratiques GIFS dans les terroirs visés; et
- aider l'équipe FSA à classer les terroirs selon leur probabilité de fournir un environnement propice à l'adoption rapide à grande échelle de la GIFS.

L'information permettra de réduire le risque de lancer un programme GIFS dans un environnement qui ne dispose pas de services gouvernementaux ou de marchés et/ou d'inciter la conception de composantes socio-économiques du programme GIFS qui permettront d'atténuer les facteurs limitatifs.

5.6 Développement des marchés

Il y a parfois une tendance à se concentrer sur les éléments biophysiques d'un programme GIFS et ignorer le potentiel que les petits changements de politique ou des améliorations de l'efficacité des marchés pourraient apporter pour stimuler l'adoption des composantes biophysiques. Les mesures visant à réduire le coût des engrais au niveau de l'exploitation ou d'augmenter les prix des produits payés aux agriculteurs ont un grand potentiel pour stimuler l'adoption de la GIFS. C'est l'une des raisons pour appuyer les approches intégrées de l'adoption de la GIFS qui se concentrent tant sur le milieu biophysique que sur les questions de marché qui ont une incidence sur l'adoption de la GIFS.

Les subventions pour les engrais ont été populaires auprès des gouvernements comme une intervention sur le marché pour accroître l'utilisation des engrais et stimuler la croissance de la production. Les subventions sont aussi populaires auprès des agriculteurs et pourtant, il y a un certain nombre d'inconvénients à leur utilisation:

- Elles sont des ajustements temporaires qui souvent n'arrivent pas à encourager les changements structurels sur les marchés des intrants, nécessaires pour changer définitivement le coût de l'engrais.
- Elles ne permettent pas de répondre à la question relative au développement du marché des intrants.
- Les agriculteurs ont peu de chances d'utiliser les engrais coûteux s'ils ne sont pas sûrs qu'ils seraient en mesure de commercialiser assez de produits agricoles pour compenser le coût de ces engrais.

Là où on recourt aux subventions, il est essentiel d'incorporer des interventions parallèles "non-subvention" pour rendre les marchés d'engrais plus efficaces, afin que les subventions puissent être réduites au fur et à mesure que le prix des engrais diminue en réaction aux interventions non-subventionnées.

Les interventions gouvernementales non-subsidées qui peuvent réduire le coût des engrais ou encourager une plus grande utilisation d'engrais comprennent:

- les investissements dans l'éducation à la vulgarisation pour montrer aux agriculteurs comment accroître l'efficacité de l'utilisation des engrais;
- les systèmes d'information sur les marchés des intrants qui fournissent aux agriculteurs de chaque localité des informations périodiques (quotidiennes, hebdomadaires, mensuelles) sur les prix des intrants et des produits, afin que les agriculteurs prennent des décisions plus éclairées sur l'utilisation des engrais et la commercialisation des produits;
- les investissements dans les infrastructures routières, portuaires et de stockage, afin de réduire les coûts de transport et de stockage liés à l'importation et à la distribution des engrais;
- les politiques bancaires aptes à faciliter l'accès en temps opportun aux devises étrangères afin que les importateurs puissent passer des commandes lorsque les conditions du marché sont favorables; et
- le contrôle efficace de la qualité des engrais pour identifier les fabricants et les détaillants qui fournissent des produits fertilisants falsifiés ou faux.

Les activités qui sont plus tributaires des initiatives du secteur privé comprennent:

- le développement des filières qui relient les marchés des intrants et les marchés des produits, fournissant souvent aux agriculteurs le crédit pour des intrants et des marchés garantis des produits pour la production excédentaire (par exemple, les systèmes de production de coton en Afrique de l'Ouest);
- le renforcement des organisations paysannes, afin qu'elles puissent consolider les commandes d'engrais pour leurs membres et assurer certaines des fonctions d'achats et de distribution elles-mêmes; et
- les programmes de formation des fournisseurs d'intrants pour renforcer leurs compétences en gestion et encourager le développement de réseaux de distribution qui assurent le lien entre les importateurs, les distributeurs, les grossistes et les détaillants de manière efficace pour réduire les coûts de transactions.

5.7 Analyse *ex ante* des performances de la technologie de la GIFS

Une analyse *ex ante* est une évaluation des effets escomptés de composants biophysiques de la GIFS (par exemple, l'engrais utilisé en combinaison avec la semence de maïs hybride), basée uniquement sur les informations disponibles *avant* la mise en œuvre du programme de promotion des composants (Figure 5.4). Dans la plupart des cas, l'analyse *ex ante* se concentre sur les répercussions au niveau des exploitations agricoles, telles que l'augmentation de rendement, la production globale et les revenus de l'exploitation agricole. En outre, il existe un nombre croissant d'outils d'aide à la décision disponibles pour faciliter les estimations d'impact à une échelle plus large (région, nation).

L'objectif de la réalisation d'une analyse *ex ante* est de:

- Vérifier dans quelle mesure les composants de la GIFS considérés pour un terroir particulier ont le potentiel d'améliorer les trois principaux objectifs d'un programme de GIFS (c'est-à-dire accroître la productivité des cultures, améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais et augmenter le revenu agricole); et
- Identifier sous quels aspects des informations supplémentaires sont requises avant de pouvoir effectuer des analyses *ex ante* exhaustives des interventions de GIFS.

Il n'y a pas de règles strictes relatives à des normes auxquelles une analyse *ex ante* devrait satisfaire, mais nous suggérons certaines "règles générales" pour en évaluer l'efficacité agronomique et les motivations économiques, ainsi qu'un indicateur pour identifier les situations dans lesquelles les performances du marché peuvent avoir besoin d'être améliorées.

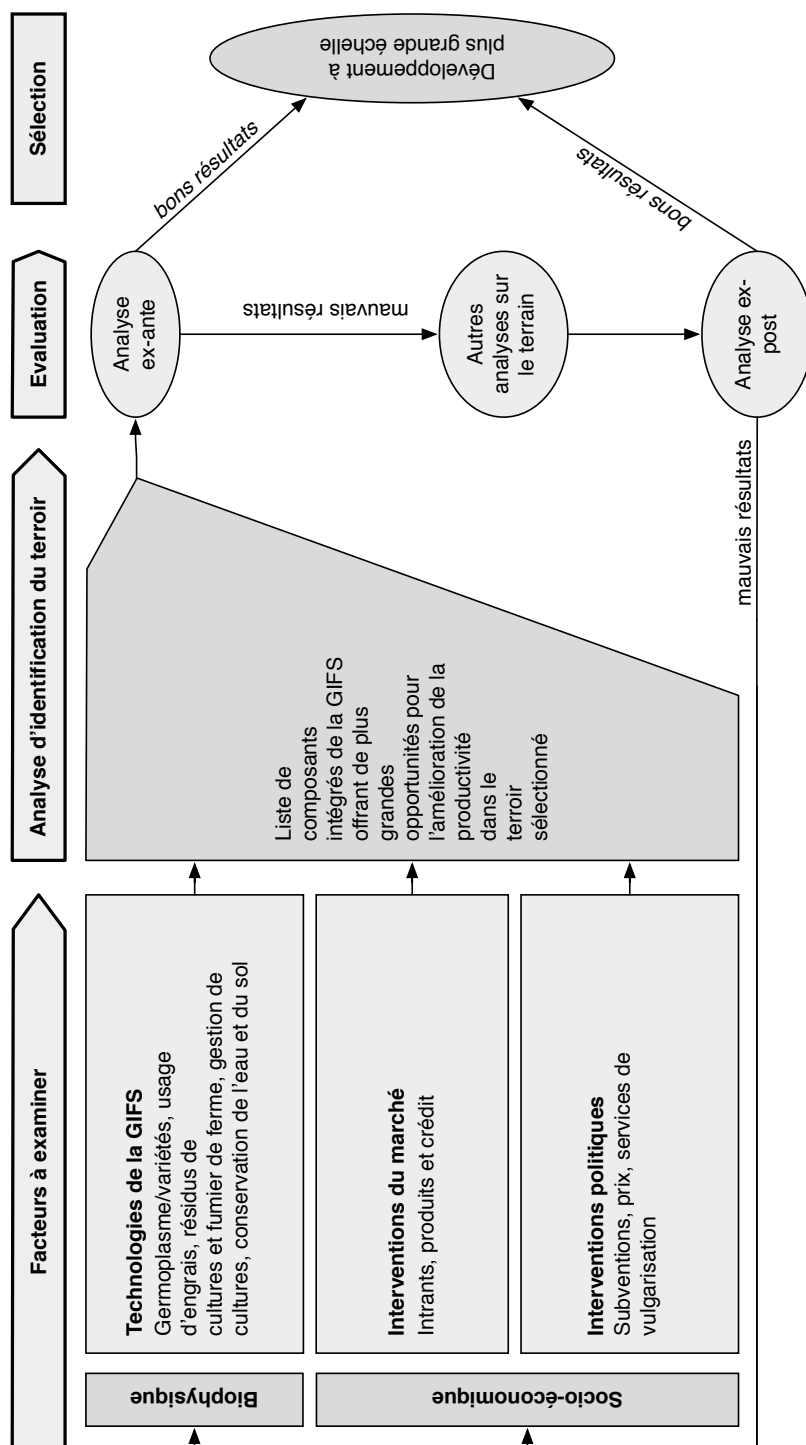


Figure 5.4 Les interventions de la GIFS ainsi que les interventions complémentaires sur les politiques et le marché devraient être évaluées au sein des terroirs concernés. Ces interventions ne devraient être élargies aux autres terroirs que si les analyses ex-ante ou ex-post montrent que les technologies produisent de réels avantages quand elles sont exécutées dans les champs des agriculteurs sous leur direction.

5.7.1 Efficacité agronomique

L'efficacité agronomique peut servir à faire une évaluation approximative de l'efficacité de l'utilisation d'engrais azotés sans toutefois fournir des informations sur les motivations économiques. L'efficacité agronomique est calculée en divisant le poids en kilogrammes de produits supplémentaires attribués à l'application des engrais par le poids en kilogrammes de nutriments appliqués.

Les informations relatives au rendement supplémentaire attribuable à l'engrais proviennent généralement de l'analyse des essais menés sur une station de recherche ou de préférence sur une exploitation agricole, avec des parcelles témoin où l'engrais n'est pas appliqué.

Les ratios d'efficacité agronomique de l'engrais utilisé dans une composante donnée de la GIFS devraient être au même niveau ou au-dessus des niveaux historiquement associés avec l'adoption réussie des engrais en Afrique. Des valeurs typiques pour l'efficacité agronomique fondées sur une analyse approfondie d'essais effectués dans les années 1960 et 1970 sont indiquées dans le tableau 5.2.

5.7.2 Incitations économiques

Le rapport valeur/coût compare l'évolution des coûts et des revenus lorsqu'un agriculteur passe des pratiques de production actuelles à un nouvel ensemble de pratiques. Il intègre des informations à la fois agronomiques (rendement) et économiques (prix/coût). Le rapport valeur/coût (RVC) est calculé en divisant une estimation de la valeur de production supplémentaire résultant d'un changement de pratiques (c'est-à-dire production supplémentaire multipliée par prix du marché) par le coût supplémentaire du passage aux nouvelles pratiques (coûts d'acquisition d'intrants, main-d'œuvre supplémentaire, etc.). Si les pratiques de la GIFS proposées comprennent des coûts autres que les engrais (par exemple, semences hybrides), ces coûts devraient également être inclus dans le dénominateur.

En Afrique subsaharienne, où les risques de production sont importants mais difficiles à quantifier et les ressources financières limitées, on a observé que les agriculteurs adoptent rarement l'engrais à moins que le rapport valeur/coût ne soit supérieur à 2.

Bon nombre de ces résultats étaient fondés sur des essais visant à tester l'effet de l'engrais plutôt que l'effet des pratiques de la GIFS qui intègrent l'engrais avec d'autres pratiques de gestion de la fertilité. L'efficacité agronomique pour la GIFS est généralement plus grande que pour les engrais appliqués comme seul changement dans la gestion de la fertilité.

Tableau 5.2 Efficacité agronomique d'engrais azotés pour une sélection de cultures en Afrique subsaharienne.

Culture	Région	Efficacité agronomique (kg/kg N)
Maïs	Afrique	Moyenne 17, maximum 53
Sorgho	Afrique de l'Est et Afrique australe	10
	Afrique de l'Ouest	7
Mil	Afrique de l'Ouest	7
Coton		5–6
Arachides		9
Café	Afrique de l'Est	8.5
	Afrique de l'Ouest	4

Les résultats d'un rapport valeur/coût sont interprétés comme suit:

- Quand le rapport valeur/coût = 1, l'agriculteur atteint le même seuil de rentabilité même quand il change de pratiques. La production peut avoir augmenté, mais il n'y a aucune incitation financière pour que l'agriculteur adopte de nouvelles pratiques.
- Un rapport valeur/coût entre 1 et 2 signifie que l'agriculteur va gagner un certain profit en effectuant le changement. L'incitation pour le changement est trop petite pour stimuler l'adoption.
- Un rapport valeur/coût >2 a traditionnellement été le minimum acceptable pour introduire de nouvelles pratiques ou de nouvelles technologies.

Un rapport valeur/coût ≥ 2 fournit une marge offrant aux agriculteurs une certaine protection contre des risques tels que les conditions météorologiques défavorables ou les attaques de ravageurs. En outre, les agriculteurs atteindront initialement des rendements plus faibles que ceux obtenus dans les parcelles de recherche et de démonstration, dont les données de rendement tendent à être utilisées pour estimer le rapport valeur/coût dans le cadre de l'analyse *ex ante*.

Par exemple, si une application de 150 kg d'engrais azoté ayant coûté 0,5 \$/kg d'engrais azoté produit un accroissement du rendement de 3000 kg/ha de grains de maïs au prix de 0,10 \$ /kg, le rapport valeur/coût est calculé comme suit:

$$\text{Rapport valeur/coût} = 3000 \text{ kg/ha} \times 0,10 \text{ \$/kg} / 150 \text{ kg d'engrais azoté} \times 0,5 \text{ \$/kg d'engrais azoté N}$$
$$\text{Rapport valeur/coût} = 300/75 = 4,0$$

Dans cet exemple, le rapport valeur/coût suggère que l'adoption conduira à de grands profits, même si le rendement est inférieur à 3000 kg/ha. La valeur seuil de 2 du rapport valeur/coût est atteinte avec une augmentation de rendements de 1500 kg de maïs.

Si la valeur du maïs diminue à 0,04 \$ /kg, la valeur du rapport valeur/coût diminue également au-dessous de la valeur seuil de 2:

$$\text{Rapport valeur/coût} = 3000 \text{ kg/ha} \times 0,04 \text{ \$/kg} / 150 \text{ kg d'engrais N} \times 0,5 \text{ \$/kg d'engrais azoté N}$$
$$\text{Rapport valeur-coût} = 120/75 = 1,6$$

Pour atteindre la valeur seuil de 2 du rapport valeur/coût un accroissement du rendement de 3750 kg est nécessaire. Ceci est peu probable, car il faudrait une efficacité agronomique d'une valeur d'environ 25 kg d'accroissement de rendement/kg d'engrais azoté appliqué.

Ces calculs servent à souligner l'importance d'effectuer des analyses *ex ante* du rapport valeur/coût pour déterminer si l'augmentation prévue du rendement est susceptible d'entraîner un résultat économique attrayant.

5.7.3 Performance du marché

Le rapport entre les prix des engrais et des produits (engrais/produits), qui indique le nombre de kilogrammes de produits requis pour payer pour un kilogramme d'engrais constitue un autre indicateur pouvant servir à évaluer les facteurs du marché.

Il n'y a aucune valeur seuil contraignante pour le rapport engrais/produit car un composant de la GIFS avec une efficacité agronomique très élevée peut conduire à un rapport valeur/coût favorable même lorsque le rapport des prix engrais/produits apparaît défavorable. Dans ce cas il est plus utile de comparer les rapports engrais/produits entre différentes zones géographiques (villages, districts, pays). Si le rapport des prix engrais/produits est relativement élevé dans le terroir en étude, il serait prudent d'intégrer certaines activités de développement du marché aux activités ciblées d'information des paysans sur les pratiques améliorées.

Des programmes pour relever les prix à la production ou abaisser les prix des engrais pourraient contribuer à l'amélioration des rapports des prix engrais/produits. Des rapports des prix engrais/produits élevés représentent

un obstacle majeur à l'adoption des engrais en Afrique subsaharienne. Généralement les prix des engrais diminuent ceux des produits et les prix à la production augmentent avec l'amélioration des routes, des ports, et la suppression des droits de douane et d'activités de rente par les commerçants. De tels problèmes ne peuvent être résolus que par des efforts concertés des gouvernements.

Une analyse *ex ante* peut être réalisée à l'aide d'une simple calculatrice de poche, mais les tableurs fournissent des moyens de construire des modèles simples qui peuvent être utilisés pour l'analyse.

5.7.4 Données requises pour des analyses *ex ante*

Une série de données minimales nécessaires pour effectuer une analyse *ex ante* comprend:

- Une évolution du rendement associée aux pratiques particulières de la GIFS en étude; de préférence une évolution du rendement moyen basée sur 5 ans ou plus de démonstrations en milieu paysan, couvrant à la fois les années de bonne et de mauvaise pluviométrie. Il est extrêmement important que l'évolution moyenne estimée comprenne tous les champs, y compris ceux où il y a eu de mauvaises récoltes ou des attaques incontrôlées d'insectes.
- Prix à la production du passé récent et prix estimatifs du futur pour les cultures importantes, de préférence les prix à la production pour les terroirs visés.
- Prix des intrants et de la main-d'œuvre des années récentes et ceux estimés pour le futur, de préférence les prix payés par les agriculteurs dans les terroirs visés. Si les derniers prix ont été subventionnés, les analyses devraient également tester la rentabilité avec des prix non subventionnés, afin de prendre en compte le possible abandon de la subvention à l'avenir.

Si les données sont disponibles et que les analystes sont compétents pour utiliser un tableur dans l'estimation de simples fonctions linéaires, il serait également utile d'examiner les tendances passées d'utilisation des engrais et la manière dont ils ont réagi à l'évolution des prix. Un minimum de 10 années de données nationales serait nécessaire sur:

- la consommation d'engrais, par culture et type d'engrais si possible;
- les précipitations (fréquence et quantité); et
- les prix des engrais et des produits.

En outre, des informations sur les variations de la qualité du sol associées à l'utilisation des composantes de la GIFS en étude fourniraient à l'analyste des possibilités d'incorporer dans les analyses les modifications survenues dans le capital sol.

Il y a trois étapes clés pour effectuer une analyse *ex ante*:

- collecte de données;
- analyse; et
- décisions relatives aux prochaines étapes.

Collecte de données

Des données de bonne qualité relatives à l'évolution du rendement sont d'une importance cruciale pour une évaluation *ex ante*. Les sources potentielles comprennent les institutions nationales de recherche agronomique, les ONG et les services de vulgarisation ayant participé à la gestion des parcelles de démonstration où des données précises ont été enregistrées sur la taille des parcelles, les rendements, le calendrier des activités clés, l'utilisation des intrants et d'autres facteurs qui affectent les rendements.

Des données sur les prix des cultures importantes sont souvent disponibles dans les systèmes d'information du marché, mais il existe aussi un certain nombre de sites Internet qui présentent des prix de certains produits échangés sur les marchés africains. Par exemple:

- Afrique Verte (<http://www.afriqueverte.org/index.cfm?srub=59>) a des données sur les prix des céréales qui remontent à 2002 pour le Mali, le Niger et le Burkina Faso.
- FAOSTAT (www.faostat.org) présente également les prix à la production des principales cultures chaque année en monnaie locale, en utilisant les informations qui leur sont envoyées par les gouvernements nationaux.

En principe, les données météorologiques proviennent des stations locales du terroir visé par l'analyse, mais si elles ne sont pas disponibles, elles peuvent être obtenues à partir des services météorologiques nationaux et régionaux.

Les prix des intrants sont plus difficiles à obtenir. Si le gouvernement offre des subventions pour l'achat d'engrais ou contrôle le marché des engrais, les prix des engrais sont généralement disponibles au bureau local du ministère de l'agriculture. Si les prix sont entièrement déterminés par les forces du marché, il sera nécessaire de consulter les fournisseurs locaux pour obtenir une série de données historiques. Il sera également important d'examiner les attentes relatives aux tendances des prix des engrais sur le marché mondial. Ce type d'information est souvent disponible sur les sites commerciaux ainsi que des séries de données sur les taux de change qui peuvent influencer sur les prix locaux des intrants importés.

Bien qu'une grande partie des données nécessaires aux analyses *ex ante* puisse être obtenue à partir de sources secondaires indiquées ci-dessus, les analystes ne devraient pas exclure la possibilité de recueillir des informations directement auprès des agriculteurs qui ont utilisé certains composants de la GIFS proposés dans les terroirs sélectionnés. Les procédures du budget participatif expliquées dans l'encadré 5.1 peuvent être développées pour fournir plus de détails sur les quantités d'intrants utilisés, les coûts (y compris les frais de crédit) et les prix du marché.

Avec l'approche du budget participatif, l'analyste peut également recueillir plus d'informations qualitatives sur la façon dont les agriculteurs prennent des décisions relatives à l'usage d'intrants. Par exemple: sont-ils disposés à acheter des engrais si la valeur estimative du rapport valeur/coût est < 2 ? Peut-être ont-ils hors de la ferme des alternatives d'utilisation de leur main-d'œuvre et de leurs fonds qui exigeraient un rapport valeur/coût de la GIFS bien supérieur à 2 avant qu'ils puissent passer des activités non agricoles à celles proposées par les projets GIFS.

Analyse

En plus d'estimer les ratios décrits ci-dessus, il est utile d'élaborer des budgets partiels pour comparer les coûts et les rendements des autres composantes de la GIFS (Encadré 5.1). Des analyses du budget partiel sont plus faciles à réaliser que celles d'une culture entière ou d'une exploitation agricole, parce qu'elles ne comparent que les coûts et avantages des éléments clés du budget qui vont subir des changements suite aux interventions proposées. Bien qu'un budget partiel comme approche constitue un raccourci, il est très important que les budgets tiennent compte de toutes les variations relatives aux entrées et aux sorties qui se produisent lors du passage d'un ensemble de pratiques à l'autre. Autrement, le budget donnera des résultats trompeurs.

Mettre les budgets sous forme de tableur fournit à l'analyste des moyens de mener une analyse de sensibilité sur le rendement des différentes récoltes et l'estimation des coûts.

Décisions relatives aux prochaines étapes

Les étapes suivantes dépendent du résultat de l'analyse *ex ante*:

- Si les résultats d'analyses *ex ante* montrent des valeurs élevées pour le rapport valeur/coût, le ratio des prix engrais/produits et l'efficacité agronomique, et les calculs du budget partiel montrent une forte performance agronomique et économique des composantes sélectionnées de la GIFS, l'étape suivante consiste à passer à la préparation d'activités visant à accroître l'adoption des composantes sélectionnées.

Encadré 5.1 Analyse du budget partiel pour des pratiques alternatives de production du maïs.

Nous utilisons l'exemple d'un budget partiel qui compare les pratiques actuelles des agriculteurs à deux traitements alternatifs pour la production du maïs (Tableau 5.3). Les étapes du budget partiel sont les suivantes:

1. Identifier et recueillir des données sur les facteurs qui changeront (rendements, prix du marché des produits, quantités et coûts des semences, et quantités et coûts des engrais). Si possible saisir les données dans un tableur en utilisant des formules pour effectuer les calculs. Comme l'usage du fumier est un facteur constant pour les trois alternatives, nous n'avons pas eu besoin de l'estimer ou de prendre en compte le travail associé à son usage.
2. Une omission possible de notre simple budget serait le travail supplémentaire qui pourrait être exigé pour désherber en raison de l'usage accru d'engrais ou pour la récolte et le stockage dû à une hausse de la production. S'il est clair que les alternatives exigent plus de travail, la main-d'œuvre supplémentaire devrait être estimée aux taux agricoles courants et inclus dans les budgets pour présenter une image plus réaliste de la manière dont les agriculteurs vont probablement considérer les avantages des pratiques alternatives.

Tableau 5.3 Analyse du budget partiel pour des pratiques alternatives de production du maïs

Item	Pratiques courantes		Alternative 1		Alternative 2	
	kg/ha	Coût Total / valeur (\$/ha)	kg/ha	Coût Total / valeur (\$/ha)	kg/ha	Coût Total / valeur (\$/ha)
Rendement	900	270	1.500	450	2.000	600
Semences	20	8	20	8	20	20
Engrais	0	0	50	35	50	35
Coûts	-	8	-	43	-	55
Bénéfice		262		407		545
Accroissement du bénéfice				145		138

3. A partir des données du budget partiel, calculer la proportion de l'efficacité agronomique et le rapport valeur/coût et mener des analyses de sensibilité sur ces données (par exemple: étant donné les prix du maïs en vigueur, à quelle valeur maximale la technologie de l'engrais pourrait se vendre avant que le rapport valeur/coût ne tombe en dessous de 2?

Les résultats du budget indicatif montrent que:

- On peut escompter que le revenu augmentera de 145 \$/ha si l'agriculteur ajoute l'engrais à un coût cumulé de 35 \$/ha; ceci correspondant à un rapport valeur/coût de 10.
- Si l'agriculteur utilise déjà de l'engrais, il peut augmenter le revenu de 138 \$/ha en achetant des semences hybrides à un coût supplémentaire de 12 \$/ha.
- Les analyses du budget montrent qu'adopter les hybrides est une décision extrêmement profitable (rapport valeur/coût > 11).
- Avant de décider de promouvoir cette composante de la GIFS dans le terroir choisi, il serait important de considérer la fiabilité de l'offre des semences hybrides et l'attitude des agriculteurs envers l'utilisation de semences qu'il faudrait acheter annuellement.

- Si les données n'étaient pas suffisantes pour mener des tests *ex ante* ou si certains des résultats obtenus étaient faibles, un programme de tests supplémentaires sur l'exploitation agricole suivi d'analyses *ex post* devrait être élaboré et mis en œuvre. Il serait utile de tester quelques modifications et améliorations des composantes de la GIFS.

5.8 Expérimentation des technologies GIFS en milieu paysan

Les technologies de la GIFS qui ne fonctionnent pas bien dans l'analyse *ex ante* devraient être testées davantage dans les champs des agriculteurs. Les essais doivent être effectués dans plusieurs exploitations choisies pour représenter la variabilité des conditions d'exploitation agricole qu'on retrouve au sein du terroir. Ces travaux devraient être menés en collaboration avec les systèmes nationaux de recherche et des ONG spécialisées dans la conduite de tests en milieu paysan.

5.9 Analyses *ex post* des performances de la technologie GIFS

L'analyse *ex post* est similaire à l'analyse *ex ante*, sauf qu'avec l'analyse *ex post* les données réelles recueillies au cours des tests en milieu paysan sont utilisées dans les calculs. Les technologies qui fonctionnent bien dans l'analyse *ex post* peuvent être considérées pour une expansion. L'analyse *ex post* peut aider à révéler les faiblesses essentielles des technologies qui réussissent mal et suggérer les domaines qui nécessitent une recherche plus approfondie, un perfectionnement ou de nouveaux tests.

5.10 Expansion de l'adoption des solutions GIFS

Nous avons maintenant atteint l'étape où la recherche et le développement ont élaboré et testé des technologies prometteuses qui se sont avérées économiquement avantageuses pour les agriculteurs dans le terroir sélectionné. Comme le terroir a été soigneusement identifié avant l'adaptation et la mise à l'essai des pratiques de la GIFS, les agriculteurs cibles ont, bien entendu, déjà été identifiés et caractérisés. La technologie peut varier d'une simple composante d'un système de culture (par exemple, la gestion du fumier de ferme) à plusieurs composantes qui sont modifiées simultanément (par exemple, l'utilisation de semences améliorées, engrais et résidus organiques).

Parvenir à une mise en œuvre à grande échelle devrait être l'objectif primordial de tous les projets qui ont introduit avec succès les pratiques de la GIFS. Trop souvent, des recherches sur la GIFS financées par des fonds publics produisent des résultats intéressants qui ne sont publiés que dans des revues non accessibles en dehors de la communauté des chercheurs. Les organismes de financement souvent ne produisent pas le matériel de vulgarisation, une partie intégrante et obligatoire des projets de recherche.

En réalité, il n'y a jamais de séparation nette entre une phase initiale du développement de la technologie et son expérimentation, et une phase ultérieure de vulgarisation pour la mise en œuvre à grande échelle. Généralement, il y a plusieurs va-et-vient entre les tests et la vulgarisation de la technologie, partant d'une mise en œuvre à petite échelle vers une expansion à grande échelle. C'est logique, car les technologies en cours de développement sont soumises au contrôle de l'agriculteur tout au long de la phase de développement plutôt que d'être développées dans un vase clos avec l'implication d'une poignée d'agriculteurs.

Malheureusement, dans le passé, l'adoption de technologies économiquement éprouvées a été souvent faible. Quelques-unes des raisons sont entre autres que:

- Les chercheurs ne sont pas intéressés ou motivés à s'engager dans le processus de vulgarisation.
- Le financement du projet ne tient pas suffisamment compte de la phase de vulgarisation.
- Les changements des conditions du marché (par exemple, les prix des produits agricoles et des intrants) rendent la technologie moins rentable.
- Les changements de priorités dans la politique du gouvernement impliquent que la technologie est redondante ou d'une faible priorité.

Même avec une technologie avérée pouvant offrir d'importants avantages aux agriculteurs, atteindre un taux d'adoption à grande échelle peut prendre 5 ans ou plus, et des améliorations peuvent s'avérer nécessaires pour affiner la technologie et l'adapter à l'évolution des besoins des agriculteurs cibles.

Il existe deux étapes logiques pour aller à l'échelle dans la mise en œuvre:

- Étendre la mise en œuvre au sein du terroir dans lequel la technologie a été mise au point; et
- Epancher la mise en œuvre vers d'autres terroirs où la technologie peut facilement s'adapter.

Il est important qu'une phase de vulgarisation soit prévue dès la phase de préparation des projets. Soit l'organisme chargé de la recherche et du développement prévoit une phase de vulgarisation, soit le projet entre en partenariat avec une institution gouvernementale ou une ONG spécialisée en vulgarisation.

5.10.1 Développement d'une stratégie de communication

Une stratégie de communication devrait être élaborée dès le début des activités au cours de l'identification du terroir. Le projet a besoin de comprendre et de connaître tous les acteurs impliqués dans la GIFS au sein du terroir où les activités sont planifiées. Il se pourrait qu'il existe des programmes, des ONG et des associations de producteurs bien établis qui travaillent dans des zones similaires ou qui se chevauchent, et qui pourraient être exploités comme des ressources.

Outre les agriculteurs, tous les autres bénéficiaires cibles du matériel de vulgarisation doivent être pris en considération:

- **Fournisseurs d'intrants** (calendrier d'épandage et quantité d'engrais, semences et autres intrants nécessaires; préparation des matériels promotionnels appropriés);
- **Marchés des produits** (quantité et calendrier de la production envisagés, prix);
- **Fournisseurs de crédit** (besoins en prêts adaptés par agriculteur et par hectare; préparation de matériels promotionnels appropriés);
- **Décideurs politiques** (avantages de la technologie mise en œuvre pour les agriculteurs et l'ensemble de la communauté, par exemple, l'expansion du commerce, l'amélioration de la sécurité alimentaire, l'augmentation de la production);
- **Vulgarisateurs** (formation sur la mise en œuvre de la technologie; ils doivent mieux connaître la technologie que l'agriculteur); et
- **Grand public** (amélioration de la fiabilité de l'approvisionnement en vivres; réduction des besoins en extension des zones de culture grâce à une meilleure productivité).

Il est évident que chaque acteur a besoin de certaines informations de base, mais en outre chacun a besoin d'informations personnalisées quant à son rôle dans le programme de vulgarisation. La stratégie de communication donc identifie la nécessité d'une variété de matériels. Une bonne campagne de vulgarisation exigera des réunions régulières entre tous les acteurs concernés, afin d'examiner les progrès réalisés et d'échanger des informations.

5.11 Elaboration de matériel de vulgarisation

Il est essentiel de commencer à penser à la conception du matériel de vulgarisation tout au début du développement de la technologie. Au fur et à mesure que les agents passent du temps sur le terrain et font connaissance avec les agriculteurs cibles, il deviendra clair vers qui les messages de vulgarisation doivent être dirigés et quels genres de supports seront plus efficaces.

Par exemple, dans un terroir donné, les agents peuvent décider que les jeunes paysannes constituent le public cible et que le support sera des affiches et dépliants illustrés dans la langue locale.

Souvent un éventail de matériaux est nécessaire, qui s'adressent non seulement aux agriculteurs, mais aussi aux autres acteurs fournissant des services et des marchés aux agriculteurs cibles.

Par conséquent, bien que des dépliants et des affiches soient peut-être suffisants pour atteindre les agriculteurs cibles, des vidéos et des émissions de radio peuvent s'avérer nécessaires pour sensibiliser les fournisseurs d'intrants et de crédit ainsi que les négociants. En outre, il pourrait être nécessaire de produire un matériel pour la formation des vulgarisateurs. Une vidéo de 5 minutes bien produite peut aussi aider énormément à expliquer aux décideurs et aux gestionnaires d'équipes de vulgarisation la technologie et les avantages qui découlent de sa diffusion.

5.11.1 Communiquer directement avec les agriculteurs

Quel que soit le support utilisé pour communiquer avec les agriculteurs, le matériel doit comprendre les informations suivantes:

- une brève description du système d'exploitation agricole et du système de culture pour lesquels les informations sur la GIFS sont pertinentes;
- des questions relatives à l'égalité entre les sexes qui doivent être prises en compte;
- les avantages pour l'agriculteur (par exemple, amélioration concrète des revenus financiers de l'agriculteur, sécurité alimentaire ou moyens de subsistance en général);
- les matériaux et équipements requis (quantités d'engrais, de semences et d'outils requis);
- les procédures (un guide de mise en œuvre de la technologie étape-par-étape, y compris le calendrier et la fréquence des opérations, ainsi que la main-d'œuvre requise);
- une simple analyse coûts-avantages (détails des coûts et des avantages supplémentaires de la technologie et une estimation globale des bénéfices quantitatifs pour l'agriculteur); et
- le risque (vulnérabilité de la technologie à la sécheresse, aux ravageurs et aux maladies ainsi qu'aux défaillances du marché).

5.11.2 Prestataires de services de vulgarisation

Des conseils relatifs à la vulgarisation peuvent être fournis par un ou plusieurs acteurs:

- **Les chercheurs** devraient être impliqués dans la phase initiale étant donné qu'ils dépendent des impressions des agriculteurs pour évaluer la valeur des technologies qu'ils développent.
- **Les agents de vulgarisation:** bien qu'ils soient responsables de fournir des conseils relatifs à la vulgarisation, ils sont souvent mal financés et démotivés et ont besoin de formation pour devenir efficaces.
- **Les fournisseurs** d'intrants bénéficient d'une amélioration des ventes lorsque les agriculteurs ont de meilleures connaissances et sont informés sur l'utilisation des intrants.
- **Les négociants en produits de base** donnent des informations à leurs fournisseurs et tirent profit de tout accroissement de rendement et productivité de la part des agriculteurs.
- **Les ONG, les groupes communautaires, les groupes religieux et les écoles** peuvent être impliqués dans la vulgarisation, dans le cadre de projets financés par des donateurs.
- **Les exploitations "pilotes"** jouent souvent un rôle important dans le transfert de technologies.

- **Les fournisseurs de crédit** peuvent concevoir des produits financiers pour promouvoir notamment des technologies de la GIFS.

5.11.3 Types de médias

Le choix des supports médiatiques dépend de plusieurs facteurs qui devraient être examinés lors du développement de la technologie:

- la complexité du message;
- l'âge et le sexe du public cible;
- l'accès aux appareils de communication (TV, radio, téléphones mobiles);
- le degré d'alphabétisation (accent mis sur le matériel visuel plutôt que textuel); et
- la langue (locale, français).

Le matériel de vulgarisation suivant peut être utilisé, en tout ou en partie, dans une campagne de promotion de la GIFS:

- **des documents écrits** peuvent être produits sous forme de manuels, de brochures ou d'affiches. Les dépliants sont généralement distribués directement aux agriculteurs, alors que les affiches servent à promouvoir les technologies dans les lieux publics, et les manuels sont généralement utilisés pour former les vulgarisateurs.
- **les stations de radio locales** peuvent être utiles pour transmettre des messages sur de petites zones géographiques.
- **les téléphones mobiles** sont maintenant largement utilisés en Afrique subsaharienne. Ils offrent des possibilités de faire circuler un simple message textuel et les agriculteurs peuvent également les utiliser pour contacter les centres d'appel qui fournissent des informations sur la gestion des cultures, ainsi que sur la météo et les prix des intrants et des produits agricoles.
- **les émissions de TV** sont généralement adaptées uniquement pour les messages transmis sur des stations ayant une grande couverture géographique.

5.12 Utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC)

Dans le passé, les vulgarisateurs s'appuyaient sur un ensemble de techniques standards, telles que "la formation et la visite", et les parcelles de démonstration pour diffuser les résultats de la recherche sur les systèmes d'exploitation agricole. Ces techniques invoquaient principalement un flux unidirectionnel d'informations de recherche qui, par l'intermédiaire de la vulgarisation, passait à l'agriculteur. Plusieurs travaux récents au cours des 10 dernières années ont montré que de bons résultats peuvent également être obtenus par une approche plus itérative et collaborative entre les agriculteurs, les vulgarisateurs et les chercheurs.

Au cours des 10 dernières années, avec l'avènement des TIC et l'adoption massive du téléphone mobile, de nouvelles possibilités pour une vulgarisation plus collaborative sont en train d'émerger. Les TIC comprennent des appareils comme la radio, la TV et le téléphone mobile. Les différents supports médiatiques peuvent être individuellement utilisés ou combinés dans une gamme d'approches:

- **former les agriculteurs** pour exécuter des tâches et des activités spécifiques;
- **éduquer les agriculteurs** afin qu'ils développent une expertise et soient mieux en mesure de prendre des décisions et de résoudre des problèmes; et
- **montrer et raconter** en utilisant des méthodes de communication visuelles et orales pour communiquer avec les agriculteurs illettrés.

L'objectif est d'utiliser les nouvelles technologies pour:

- fournir les services de vulgarisation, d'aide et de conseil agricole aux agriculteurs pauvres qui habitent dans les zones reculées avec peu d'accès aux informations; et
- donner aux agriculteurs l'accès aux informations relatives aux méthodes permettant d'augmenter les rendements, réduire les pertes et prendre de bonnes décisions économiques fondées sur une connaissance actualisée des prix du marché.

5.12.1 Téléphones portables

Dans cette approche, des informations agricoles, fournies par les institutions de recherche agricole et autres experts, sont examinées par un conseil d'experts et traduites en une base de données. Les organisations de vulgarisation agricole récupèrent alors ces informations, les analysent et les réorganisent pour diffusion par téléphone portable.

Les agriculteurs accèdent à ces données par l'envoi de questions sous forme de courts messages (SMS) directement à partir de leurs portables à un numéro désigné. Si un agriculteur n'a pas de téléphone portable et souhaite utiliser ce service, il peut aller voir le vulgarisateur local équipé d'un téléphone, qui consultera ces informations de sa part.

Les informations suivantes peuvent être mises à la disposition des utilisateurs sur les réseaux de téléphonie mobile:

- **Prix sur le marché.** Les informations quotidiennes sur les prix sur le marché des produits agricoles dans tout le pays renforcent le pouvoir de négociation des agriculteurs tant à la vente qu'à l'achat.
- **Prévisions météorologiques.** Elles peuvent comprendre des prévisions météo sur 3 jours et des prévisions saisonnières.
- **Répertoire des fournisseurs d'intrants.** Il peut donner accès aux numéros de téléphone et adresses des fournisseurs d'intrants dans tout le pays.
- **Google Commerce.** Marché virtuel où les agriculteurs peuvent poster leurs produits destinés à la vente et recevoir des réponses qui leur donnent des informations relatives aux contacts des opérateurs intéressés.
- **Meilleures pratiques en agriculture.** « Paquets » d'informations qui donnent des renseignements agricoles détaillés sur l'agronomie des cultures.
- **Recommandations relatives aux engrais.** Elles sont instantanément disponibles en appelant un numéro désigné, en écoutant une voix préenregistrée, et en répondant aux questions en appuyant sur les chiffres du clavier du téléphone mobile. Une réponse par texte apparaîtra tout de suite avec les recommandations d'engrais spécifiques pour les besoins particuliers de l'agriculteur. L'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) a été un pionnier de l'usage du téléphone portable dans des lieux où les agriculteurs ont besoin d'informations spécifiques sur la gestion des nutriments du riz (<http://irri.org/knowledge/tools/nutrient-management-decision-tools>).

L'usage du téléphone portable dans le cadre de la vulgarisation agricole a été initié et développé par la Fondation Grameen (<http://www.grameenfoundation.applab.org/ckw/section/index>).

Avantages

- L'accès aux informations et aux conseils est immédiat.
- Il y a une indépendance dans l'acquisition de connaissances (les agriculteurs des zones reculées ne dépendent pas des connaissances dispensées pendant les rares visites des vulgarisateurs).
- La connaissance des prix précis quotidiens du marché donne aux agriculteurs le pouvoir de négocier un meilleur prix pour leurs produits.

- Les agriculteurs peuvent poser des questions supplémentaires et recevoir des rappels relatifs par exemple au moment d'appliquer les engrais.

Inconvénients

- Il faut qu'il y ait un fournisseur de services de téléphonie mobile.
- Les agriculteurs doivent posséder un téléphone mobile ou y avoir accès.
- Les vulgarisateurs doivent être équipés de téléphones portables, et formés sur l'utilisation de toutes les applications pertinentes, pour qu'ils puissent passer des informations et devenir le canal par lequel les agriculteurs accèdent à la base de données d'informations des TIC.
- Les agriculteurs doivent avoir un niveau d'instruction de base.

5.12.2 Ordinateurs pour l'accès à Internet

Comme pour le cas du téléphone portable, les informations agricoles, collectées par les institutions de recherche agricole et les experts sur le terrain, sont examinées par un conseil d'experts, et traduites en une base de données. Les organisations de vulgarisation agricole examinent alors ces informations et les réorganisent pour une diffusion sous forme de logiciel informatique en ligne avec l'aide d'experts en informatique.

Les agriculteurs utilisent des ordinateurs pour accéder à des informations agricoles sur des sites Internet agricoles. Sur certains sites, l'utilisateur répond à une série de questions présentées dans un formulaire à remplir à l'écran et le programme informatique envoie les conseils requis en retour (par exemple des recommandations d'engrais). Une question importante à régler est l'emplacement de l'ordinateur communautaire et la personne qui sera responsable de son entretien.

Avantages

- L'agriculteur accède aux informations et aux conseils.
- L'acquisition des connaissances procure de l'indépendance.
- L'accès à une grande variété de sites Internet agricoles avec photos et courts-métrages visibles sur grand écran (contrairement au petit écran du téléphone portable).
- Un ordinateur par village pourrait s'avérer suffisant pour servir la communauté agricole entière de la zone environnante.

Inconvénients

- L'agriculteur a besoin d'accéder à un ordinateur avec accès à Internet.
- Les agriculteurs doivent être instruits et avoir des connaissances élémentaires sur le fonctionnement des ordinateurs.
- Les vulgarisateurs doivent avoir une formation en informatique et une connaissance des sites agricoles disponibles et de ceux qui répondent aux besoins spécifiques des agriculteurs.

5.12.3 Vidéo

L'avantage de vidéos présentées en langue locale est que le matériel peut être compris même si les niveaux d'instruction des agriculteurs sont bas. Des courts-métrages réalisés avec un simple appareil d'enregistrement

vidéo portable peuvent être faits par des enseignants en agriculture ou des scientifiques des institutions gouvernementales, des experts d'ONG et des agriculteurs progressistes pour diffuser les connaissances auprès des agriculteurs. Les films devraient être faits au niveau local et contenir des séquences d'activités exécutées à la ferme qui soient pertinentes et instructives pour le téléspectateur.

Après la réalisation de la vidéo, la précision, la clarté et la pertinence du contenu devraient être réexaminées par des experts agricoles avant sa distribution. Le contenu pourrait montrer:

- un bref aperçu général verbal de tout le processus;
- une liste détaillée des ressources exigées et des coûts associés;
- les instructions étape par étape relatives au travail de terrain requis;
- un résumé des coûts et avantages; et
- une présentation des échanges avec les agriculteurs sur le terrain qui répond aux questions et préoccupations communes.

Les vidéos peuvent être distribuées dans les villages concernés par les vulgarisateurs et présentées dans des lieux publics, sous la supervision des vulgarisateurs. Ces derniers jouent un rôle primordial pour aider les agriculteurs à suivre activement les projections vidéo, pour encourager le débat après les séances et pour fournir un suivi de soutien sur le terrain.

Une vidéo filmée dans un village donné peut être utile comme matériel de vulgarisation pour un village avoisinant où le contenu est pertinent, utilisant un système de distribution rotatif supervisé par les vulgarisateurs. Les vidéos peuvent couvrir une grande variété de sujets agricoles, de l'entretien des cultures à la gestion du bétail, mais la pertinence par rapport aux besoins des agriculteurs est assurée en filmant au niveau local. Digital Green a été le pionnier de l'utilisation de la vidéo comme outil de vulgarisation (<http://www.digitalgreen.org/>).

Avantages

- L'alphabetisation n'est pas nécessaire car l'audio est fourni en langue locale.
- Les projections peuvent être répétées aussi souvent que nécessaire (pour des approches pas-à-pas de la résolution de problèmes qui ont besoin d'être approfondies).
- Il y a un sentiment d'appropriation et de pertinence quand un agriculteur connu de tous dans le village est l'acteur principal à l'écran.

Inconvénients

- Chaque village doit être équipé d'un lecteur vidéo. Les ordinateurs dotés de la capacité de lecture vidéo sont moins efficaces, car les petites dimensions de l'écran limitent la taille de l'audience.
- Les vulgarisateurs doivent être formés en matière d'usage des caméras vidéo et de principes de base de la production de films.
- Les bénéficiaires principaux de la vidéo sont souvent les pairs immédiats de ces agriculteurs qui sont enregistrés.
- La motivation provenant du témoignage de l'agriculteur pourrait être limitée au voisinage immédiat de l'agriculteur.

5.12.4 Stockage de données

Les principales organisations agricoles, telles que le Programme Alimentaire Mondial, cherchent constamment les voies et moyens de comprendre les défis auxquels les agriculteurs font face dans les zones éloignées, et sont souvent handicapées par un manque de sources efficaces et fiables d'informations.

Des téléphones portables dotés d'un dispositif GPS peuvent être utilisés pour recueillir les données géo-référencées des exploitations agricoles visitées. Ces données peuvent ensuite être transformées en cartes

montrant des représentations spatiales d'un aspect donné (par exemple, la possession d'un téléphone portable) et des problèmes rencontrés sur le terrain (par exemple, la réponse à l'utilisation d'engrais).

Les données de téléphone portable peuvent aider aussi à identifier des emplacements géographiques où les besoins en services sont les plus prononcés, et communiquer les résultats de leur impact. Les lois relatives à la protection de la vie privée et les autres aspects légaux devront être prises en compte pour éviter l'usage impropre des données collectées.

Les TIC auront probablement un impact profond sur les services de vulgarisation dans les prochaines décennies, notamment à mesure que la technologie devient plus abordable et la capacité des vulgarisateurs et des chercheurs à utiliser les nouvelles technologies progresse grâce à la formation.

5.13 Conclusions

Dans cette section, nous avons examiné quelques options pour cibler la GIFS dans les systèmes de culture en Afrique subsaharienne. Nous avons souligné l'importance d'une bonne analyse des systèmes d'exploitation agricole et des systèmes de culture, ainsi qu'une évaluation de l'environnement au sein duquel les agriculteurs opèrent (environnement politique et marchés) avant de commencer le processus de mise en œuvre. Les interventions GIFS devraient d'abord réussir le test de l'analyse *ex ante* avant les essais sur terrain, et la mise en œuvre à grande échelle ne devrait démarrer que si l'analyse *ex-post* montre que les technologies offrent des avantages économiques aux agriculteurs.

Fournir du matériel de vulgarisation pertinent aux praticiens représente un aspect important. Même si ce manuel vise à fournir des informations de base sur la GIFS aux vulgarisateurs, d'autres documents de vulgarisation concernant les systèmes de culture et les pratiques agricoles spécifiques sont disponibles sous divers formats. La technologie moderne offre des opportunités passionnantes pour atteindre les agriculteurs via le téléphone portable, Internet et la vidéo en complément aux dépliants et livrets.

5.14 Liste d'ouvrages à lire

Cette liste sert de guide de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d'une explication *en italique*. Là où la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Boughton, D., Crawford, E., Krause, M. and de Frahan, B. (1990) Economic analysis of on-farm trials: a review of approaches and implications for research program design. Michigan, MA: Department of Agricultural Economics, Michigan State University. Retrieved August 2012 from http://aec.msu.edu/fs2/inputs/documents/boughton_crawford_etal_SP90-78.pdf.

Cet article traite des méthodes et approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

CIMMYT (1988) From Agronomic Data to Farmer Recommendations: An Economics Workbook. Mexico, DF: CIMMYT. Retrieved August 2012 from <http://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/830/13803.pdf?sequence=4>.

Un texte standard sur l'évaluation de la rentabilité des pratiques agronomiques, disponible en ligne.

Crawford, E., Jayne, T. and Kelly, V. (2006) Alternative Approaches for Promoting Fertilizer Use in Africa. Agriculture and Rural Development Discussion Paper 22, Washington DC: World Bank. Retrieved August 2012 from http://siteresources.worldbank.org/INTARD/Resources/ARD_DP22_FINAL.pdf.

Crawford, E. and Kamuanga, M. (1987) L'Analyse Economique des Essais Agronomiques pour la Formulation des Recommandations aux Paysans. Michigan, MA: Department of Agricultural Economics, Michigan State University. Retrieved August 2012 from <http://aec.msu.edu/fs2/papers/older/idprp6f.pdf>.

Cet article traite des méthodes et des approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

Crawford, E. and Kamuanga, M. (1988) Economic analysis of agronomic trials for the formulation of farmer recommendations Michigan, MA: Department of Agricultural Economics, Michigan State University. Retrieved August 2012 from <http://www.aec.msu.edu/fs2/papers/older/idprp6.pdf>.

Cet article traite des méthodes et des approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

Crawford, E. and Kelly, V. (2001) Evaluating Measures to Improve Agricultural Input Use. Michigan, MA: Department of Agricultural Economics, Michigan State University. Retrieved August 2012 from <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/11686/1/sp01-55.pdf>.

Cet article traite des méthodes et des approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

Dillon, J. and Hardaker, J. (1977) Agricultural decision analysis. Iowa State University Press, Iowa.

Dillon, J. and Hardaker, J. (1993) Farm management research for small farmer development. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.

Deux livres sur la science économique des décisions relatives à la gestion d'une exploitation agricole.

Dorward, P., Shepherd, D. and Galpin, M. (2007) Participatory farm management methods for analysis, decision making and communication. Rome: FAO. Retrieved August 2012 from http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/ags/publications/participatory_FM.pdf.

Un manuel très utile sur les méthodes participatives.

Galpin, M., Dorward, P. and Shepherd, D. (2000) Participatory Farm Management (PFM) methods: a field manual. Reading, UK: Departments of Agriculture and Agricultural Extension and Rural Development, The University of Reading. Retrieved August 2012 from www.fao.org/fileadmin/.../participatory_FM.pdf.

Un manuel très utile sur les méthodes participatives. Les figures 5.2 et 5.3 sont présentées et examinées dans ces deux articles.

Giller, K.E., Tittonell, P., Rufino, M.C., van Wijk, M.T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., Rowe, E.C., Bajjukya, F., Mwijage, A., Smith, J., Yeboah, E., van der Burg, W.J., Sanogo, O.M., Misiko, M., de Ridder, N., Karanja, S., Kaizzi, C., K'ungu, J., Mwale, M., Nwaga, D., Pacini, C. and Vanlauwe, B. (2011) Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural Systems* 104, 191–203.

Un document général qui examine le cadre de NUANCES (Utilisation d'éléments nutritifs dans les systèmes d'élevage et de culture - Efficacité et échelles) pour l'analyse de systèmes d'exploitations agricoles et l'évaluation des compromis en matière de gestion de la fertilité des sols qui mène à l'idée de pratiques de gestion qui "conviennent le mieux".

Harrington, L. (1982) Exercises in the economic analysis of agronomic data. Mexico, DF: CIMMYT. Retrieved August 2012 from <http://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1005/7030.pdf?sequence=1>.

Cet article traite des méthodes et des approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

Kelly, V. (2005) Farmers' Demand For Fertilizer In Sub-Saharan Africa. Department of Agricultural Economics, Michigan State University. Retrieved August 2012 from http://aec.msu.edu/fs2/inputs/documents/WB_demand_paper_August_18_2005_Final_full.pdf.

Kelly, V. (2005) Fertilizer demand in sub-Saharan Africa: Realizing the potential. *Policy Synthesis*, 77, 1–4. Washington DC: USAID Office of Sustainable Development. Retrieved August 2012 from <http://www.aec.msu.edu/fs2/polsyn/number77.pdf>.

Kelly, V. (2006) Factors Affecting Demand for Fertilizer in Sub-Saharan Africa. Agriculture and Rural Development Discussion Paper 23, Washington DC: World Bank. Retrieved August 2012 from http://siteresources.worldbank.org/INTARD/Resources/ARD_DP23_FINAL.pdf.

Kelly, V. (2007) Guide méthodologique pour les études sur les impacts de la gestion des ressources naturelles. International Resources Group, Washington DC.

Guide pour le suivi et l'évaluation des interventions des projets, disponible en ligne.

Morris, M., Kelly, V., Kopicki, R. and Byerlee, D. (2007) Fertilizer Use in African Agriculture. Lessons Learned and Good Practice Guidelines. 144. Washington DC: World Bank. Retrieved August 2012 from <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/6650/390370AFR0Fert101OFFICIAL0USE0ONLY1.pdf?sequence=1>.

Une collection de publications relatives à l'usage d'engrais dans l'agriculture au sud du Sahara.

Ojiem, J.O., de Ridder, N., Vanlauwe, B. and Giller, K.E. (2006) Socio-ecological niche: A conceptual framework for integration of legumes in smallholder farming systems. International Journal of Agricultural Sustainability 4, 79–93.

Le concept de niches socio-écologiques peut être utilisé pour conceptualiser la façon dont les technologies de la GIFS conviennent le mieux aux systèmes d'exploitation agricole basés sur de petites structures et ne sont pas limités au rôle des légumineuses qui fixent l'azote.

Rufino, M.C., Dury, J., Tittonell, P., van Wijk, M.T., Herrero, M., Zingore, S., Mapfumo, P. and Giller, K.E. (2011) Competing use of organic resources, village-level interactions between farm types and climate variability in a communal area of NE Zimbabwe. Agricultural Systems 104, 175–190.

Quelquefois, les facteurs limitant la GIFS se trouvent à l'échelle du village et non à l'échelle de l'exploitation individuelle. Cet article examine la manière dont le fumier peut être le mieux déployé pour la GIFS à l'échelle du village et démontre qu'il n'y a pas assez de fumier pour fertiliser tous les champs, soulignant la nécessité d'intrants nutritifs externes sous forme d'engrais.

Shiferaw, B., Freeman, H. and Swinton, S. (2004) Natural Resource Management in Agriculture: Methods for Assessing Economic and Environmental Impacts. CABI, Wallingford, UK.

Ce livre est une discussion sur les caractéristiques uniques et les difficultés méthodologiques d'évaluation de l'impact de la gestion des ressources naturelles.

Tefft, J. (1991) Une Analyse Economique des Essais Variétaux et Agronomiques à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles. Washington DC: USAID and l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles. Retrieved August 2012 from http://www.aec.msu.edu/fs2/promisam_2/Tefft_Sen_Trials_Report_French_Latest_fu.pdf.

Cet article traite des méthodes et des approches pour l'analyse des données d'essai et l'élaboration de recommandations.

Tittonell, P., Misiko, M. and Ekise, I. (2008) Talking soil science with farmers. LEISA Magazine, 24.2, 9–11. LEISA. Retrieved from http://www.agriculturesnetwork.org/magazines/global/living-soils/talking-soil-science-with-farmers/at_download/article_pdf.

De bonnes idées sur la façon de discuter de la GIFS avec les agriculteurs.

Tittonell, P., van Wijk, M.T., Herrero, M., Rufino, M.C., de Ridder, N. and Giller, K.E. (2009) Beyond resource constraints – exploring the biophysical feasibility of options for the intensification of smallholder crop-livestock systems in Vihiga district, Kenya. Agricultural Systems 101, 1–19.

Une analyse ex-ante détaillée relative à la manière dont différentes approches d'intensification « conviennent » à une diversité de petits exploitants.

Tittonell, P., Muriuki, A., Shepherd, K.D., Mugendi, D., Kaizzi, K.C., Okeyo, J., Verchot, L., Coe, R. and Vanlauwe, B. (2010) The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa—a typology of smallholder farms. *Agricultural Systems* 103, 83–97.

Cet article examine la diversité des petits exploitants agricoles qu'on retrouve dans les zones densément peuplées des régions montagneuses d'Afrique de l'Est par rapport à la fertilité des sols et les approches pour révéler cette diversité grâce à la classification des exploitations.



Photo 5.1 Agriculteurs discutant de la réponse des arachides à l'engrais de P à Pallisa, Ouganda avec Peter Ebanyat



Photo 5.2 Démonstrations de l'évaluation de la gestion des éléments nutritifs avec les agriculteurs de la province occidentale au Kenya.



Photo 5.3 Les légumes profitent de l'effet résiduel des engrais appliqués aux bananes dans les hautes terres en Ouganda.



Photo 5.4 Un magasin d'engrais doit avoir un toit étanche et un plancher dur. Les engrais doivent être stockés sur des palettes en bois pour empêcher la formation de croûtes.



Photo 5.5 Utilisation du téléphone mobile pour accéder aux informations sur des cultures dans une plantation de bananes en Ouganda.



Photo 5.6 Les négociants représentent un lien essentiel entre les agriculteurs et le marché. Ils devraient être consultés et impliqués dans les campagnes visant à accroître la productivité.



Photo 5.7 Un centre de formation en informatique au Kenya exploité par un fournisseur d'intrants agricoles pourrait devenir un outil important pour la diffusion d'informations agricoles.



Photo 5.8 Les campagnes de vulgarisation doivent rivaliser avec les campagnes promotionnelles commerciales pour capter l'attention des agriculteurs. Les entreprises de téléphonie mobile offrent un service important dans les zones rurales!



Photo 5.9 Une boutique très fréquentée dans la province occidentale au Kenya où on pouvait acheter les engrais au moyen d'unités de téléphone mobile.



Photo 5.10 Souvent, la contribution la plus importante que les gouvernements peuvent apporter pour la GIFS est d'améliorer les routes et par conséquent faire baisser les prix de l'engrais!



Photo 5.11 Une propriétaire de boutique montrant les résultats de l'utilisation de variétés améliorées de semences de maïs.



Photo 5.12 Des sorties éducatives d'agriculteurs offrent des occasions aux chercheurs et vulgarisateurs de recueillir des réactions utiles de la part de leurs clients.



Photo 5.13 Des ateliers où les agriculteurs prennent le rôle de leader donnent des indications utiles sur la façon dont les agriculteurs perçoivent et jugent les résultats des travaux de vulgarisation.

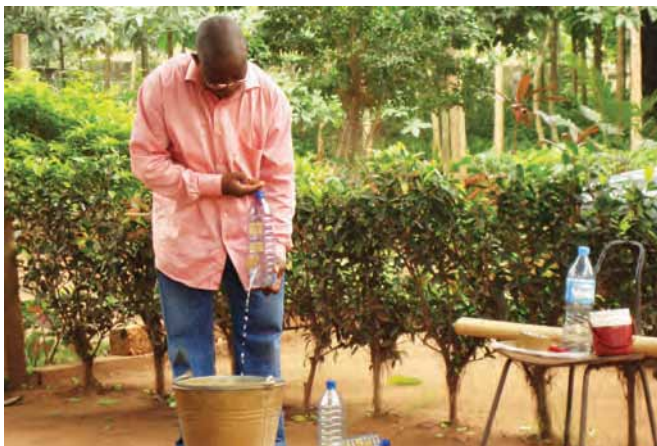


Photo 5.14 Un vulgarisateur se sert de bouteilles d'eau en plastique pour démontrer le principe de "facteurs limitants" selon la loi de Liebig sur le minimum.



Photo 5.15 Beaucoup d'enseignements peuvent être tirés des visites aux fournisseurs d'intrants. Par exemple, quels engrais sont les plus populaires et quelle quantité les agriculteurs achètent-ils chaque saison ?



1



2

Photo 5.16 Des participants à un stage pratique pour agriculteurs votent avec des cartes colorées pour noter le manioc cultivé selon des pratiques normales des agriculteurs (1, cartes rouges) et selon de la GIFS (2, cartes vertes).

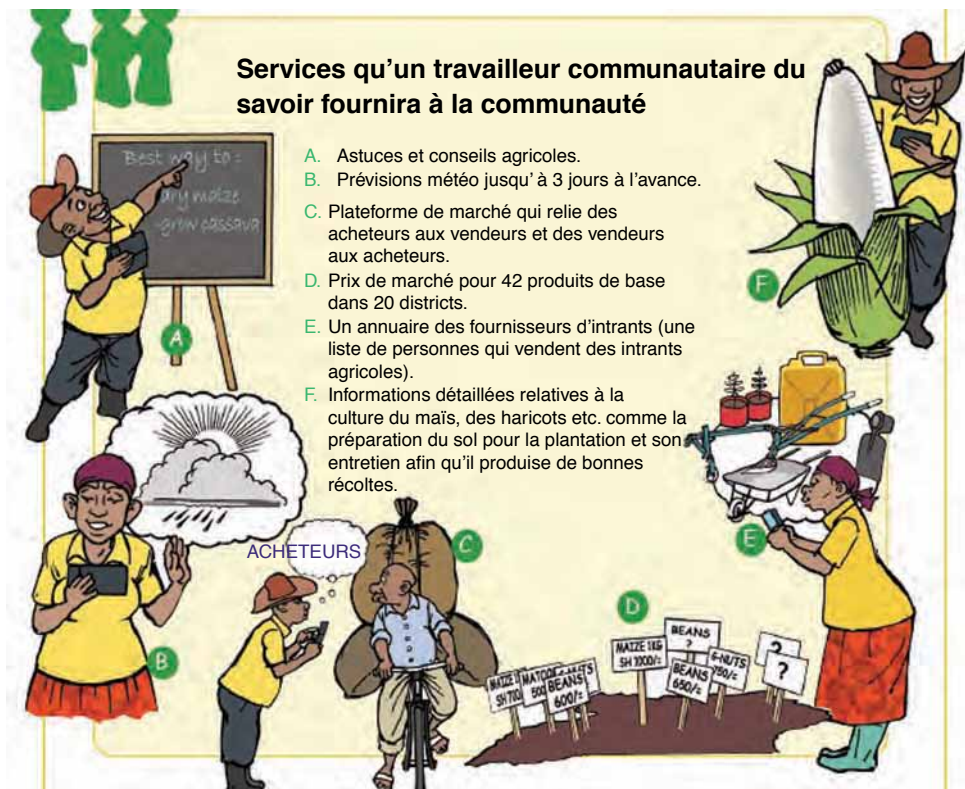


Photo 5.17 Système des travailleurs communautaires du savoir (CKW) développé par la Fondation Grameen. Les CKW sont des villageois formés pour jouer le rôle de vulgarisateurs au sein de leurs propres communautés. Le téléphone portable est souvent utilisé pour recueillir les données géo-référencées et diffuser des informations.



Photo 5.18 Le gestionnaire d'éléments nutritifs pour le système du riz développé par l'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) offre aux agriculteurs un moyen efficace pour obtenir sur Internet des recommandations d'engrais pour leurs champs de riz. L'utilisateur répond à une série de questions pour arriver à une recommandation d'engrais spécifique au site.

Photo 5.19 Une préparation minutieuse du contenu et du processus est nécessaire pour réaliser du matériel audio-visuel efficace destiné aux programmes de vulgarisation. Le caméraman et le preneur de son reçoivent des instructions du directeur qui organise chaque scène sur la base de discussions et planification préalables.





Photo 5.20 Les agriculteurs célébrant la mise en œuvre réussie de la GIFS dans divers systèmes de culture et systèmes d'exploitation agricole dans les pays d'Afrique subsaharienne.

6 Sols et production agricole - une introduction



6.1 Introduction

Les travailleurs venant d'horizons divers, y compris ceux qui n'ont aucune formation technique agricole, sont impliqués dans le développement et le déploiement de techniques visant à améliorer la productivité des exploitations agricoles grâce à la gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS).

Cette section est une introduction pour ceux qui participent à la promotion de la gestion intégrée de la fertilité des sols, mais qui ont peu de connaissances de base des sols et de la fertilité des sols. L'objectif est de fournir des informations sur les principes qui sous-tendent les pratiques de la GIFS.

6.2 Fonctions et qualités du sol y compris les indicateurs de qualité

Le mot "sol" indique les matières minérales et organiques non consolidées sur la surface de la terre qui sert de milieu naturel pour la croissance des plantes. Il est donc un attribut fondamental qui détermine la productivité primaire et la vie sur terre. Le sol est inséparable de la terre, principal intrant et facteur de production en agriculture.

La vie humaine est tributaire de l'agriculture. La capacité de la terre à soutenir les activités agricoles donne une mesure primaire de sa valeur économique, et est généralement mesurée sur la base de la capacité du sol à assumer certaines fonctions clés qui soutiennent les cultures.

La terre est un bien économique qui peut être vendu, échangé ou loué et dont la valeur est directement liée à la fertilité des sols qu'elle contient. Ce n'est pas par hasard que les sociétés les plus riches se sont développées dans les zones où la fertilité inhérente du sol est élevée.

La densité de la population est la plus élevée dans les hauts plateaux africains, où les sols sont généralement plus fertiles et où le climat permet deux campagnes agricoles. Le sol est le principal actif de l'agriculteur, et sa bonne gestion va économiquement valoriser les terres à long terme.

6.2.1 Fonctions de base du sol

Le sol a cinq fonctions de base qui sont importantes pour assurer des moyens de subsistance durables:

- **Milieu pour la croissance des plantes.** Le sol fournit le moyen de production de la biomasse végétale utilisée comme denrée alimentaire, aliment du bétail et fibres. C'est cette fonction clé qui est à la base de la chaîne alimentaire de la terre et de l'agriculture.
- **Protection de l'environnement.** Le sol est responsable du filtrage, de la désactivation ou la destruction des polluants potentiels de l'environnement, par le contrôle des flux d'eau de pluie, de la fonte de la neige et de l'eau d'irrigation y compris les solutés dissous et les sédiments en suspension. Les éléments minéraux et les microbes qui se produisent naturellement dans le sol fournissent les moyens de dégradation, de capacité tampon et/ou de désintoxication des produits organiques et inorganiques potentiellement nocifs générés par des processus naturels, industriels et anthropiques (ou "artificiels"). Le sol joue donc un rôle crucial dans le "nettoyage" de l'air et de l'eau que nous utilisons.
- **Habitat pour divers organismes biologiques.** Le sol abrite une multitude de faune et flore à la fois micro et macro, et contribue ainsi à maintenir un large éventail de matériaux génétiques ou héréditaires, y compris les plantes, ainsi que la flore et la faune des sols.
- **Source de matières premières.** Les éléments chimiques utilisés par les plantes en croissance sont stockés, libérés, transformés et recyclés dans le sol. Le sol contient aussi des minéraux et de l'eau qui peuvent être utilisés comme matières premières dans les activités économiques, y compris les agro-industries telles que la fabrication d'engrais.
- **Espace/plate-forme physique.** Le sol soutient diverses structures civiles, comme les bâtiments et les routes, et joue un rôle de dépôt de trésors archéologiques, et de déchets liés à l'habitat humain.

Ces fonctions de base mettent en exergue le rôle important du sol dans l'agriculture et dans l'environnement en général. L'objectif majeur d'une gestion durable des terres vise le maintien et l'amélioration des caractéristiques des sols ayant une influence sur ces fonctions de base et cela nous amène à la notion de qualité des sols.

6.2.2 Fertilité des sols

La fertilité des sols fait référence à la capacité d'un sol à soutenir la production des cultures et du bétail. Un sol fertile peut soutenir la croissance optimale des végétaux de la germination de la semence à la maturité de la plante. Ce soutien consiste principalement à fournir:

- un volume de sol adéquat pour le développement racinaire de la plante;
- de l'eau et de l'air pour le développement racinaire et la croissance;
- les éléments chimiques pour répondre aux besoins nutritionnels de la plante; et
- l'ancrage pour la structure végétale qui en résulte.

Ces attributs sont souvent utilisés pour décrire la "qualité productive" générale d'un sol agricole.

À cet égard, nous pouvons aussi faire la distinction entre *les indicateurs de la qualité du sol inhérents* et *dynamiques*:

- Les indicateurs *inhérents* de la qualité du sol se rapportent aux caractéristiques du sol dans son état naturel qui lui permettent de fonctionner correctement, dont la texture du sol, la profondeur et la roche-mère (minéralogie). Alors que la texture du sol ne change pas au fil du temps, sa profondeur peut diminuer à la suite de l'érosion provoquant un changement de la texture de la couche supérieure du sol. Généralement, nous adaptons les pratiques agricoles aux propriétés inhérentes des sols.
- Les indicateurs *dynamiques* de la qualité du sol concernent les attributs qui dépendent de la façon dont le sol est géré et comprennent la teneur en matière organique du sol, la capacité de rétention de l'eau et des nutriments, et la structure du sol. Les stocks de phosphore (P) et de potassium (K) dans le sol peuvent être augmentés au fil du temps grâce à l'application d'engrais et de fumier animal. La texture de la couche supérieure du sol peut être considérée comme une propriété dynamique, parce qu'elle est affectée par l'érosion. Ces indicateurs évoluent avec le temps et sont directement affectés par les pratiques agricoles.

Parce qu'il est difficile, voire impossible, de manipuler les caractéristiques inhérentes du sol dans la production végétale, le maintien et l'amélioration des paramètres dynamiques des sols est le principal objectif de la gestion des sols en agriculture. Par exemple, il existe des possibilités pour les agriculteurs de gérer la matière organique du sol et les propriétés biologiques associées afin d'influencer la productivité des sols agricoles.

6.3 Le sol comme source d'eau et de nutriments pour la production des cultures

Les sols contiennent quatre constituants essentiels:

- l'**air** (environ 20 à 30% du volume);
- la **solution du sol** (environ 20 à 30% du volume);
- la **fraction minérale** (environ 45% du volume);
- la **matière organique** (environ 5% du volume); et
- la **faune et la flore du sol**.

En plus de la lumière, les plantes ont besoin d'eau et de nutriments pour se développer et produire une récolte (c'est-à-dire des céréales, des tubercules, des fruits, la matière sèche pour le fourrage). Nous allons maintenant examiner la contribution des éléments constitutifs du sol à la croissance et au développement des cultures.

La porosité du sol (c'est-à-dire le volume du sol occupé par l'air et la solution du sol) fournit de l'espace pour la respiration des racines et des micro-organismes et pour le stockage d'eau. Un sol bien drainé fournit suffisamment d'humidité pour la croissance des plantes, et une aération suffisante pour un bon fonctionnement des racines. Dans un sol très sec, tous les pores (petits trous et canaux entre les particules du sol) sont remplis d'air, et le fonctionnement du système racinaire ainsi que la croissance de la plante sont compromis en raison de la sécheresse. Dans un sol inondé, les pores sont saturés d'eau de façon que les racines de la plupart des cultures ne puissent pas respirer et peuvent donc mourir. Seul le riz fait exception parce qu'il a des racines qui peuvent respirer dans de l'eau stagnante.

Les nutriments sont présents dans le sol, l'air, ou dans l'eau contenue dans les sols (appelée la "solution du sol"). Il y a 18 éléments chimiques essentiels qui sont nécessaires pour la croissance normale et le plein développement des plantes.

Ils comprennent trois éléments essentiels qui sont nécessaires à la croissance des plantes, mais pas pour la nutrition des cultures. Le carbone (C) est obtenu à partir du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air, l'hydrogène (H) est obtenu à partir de l'eau, et l'oxygène (O) à partir de l'eau et de l'air. Ces éléments, C, H et O, sont transformés par la photosynthèse, le "moteur" de la croissance des plantes, en glucides pour la croissance et le développement des plantes et la production des cultures.

Pour les 15 autres éléments chimiques, nous faisons la distinction entre les éléments nutritifs primaires, les éléments nutritifs secondaires et les oligo-éléments en fonction de la quantité de chacun des nutriments contenus dans les plantes:

- Les nutriments primaires essentiels tirés du sol sont l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K).
- Les nutriments secondaires essentiels sont le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et le soufre (S).
- Les oligo-éléments essentiels tirés du sol sont le fer (Fe), le manganèse (Mn), le bore (B), le zinc (Zn), le cuivre (Cu), le chlore (Cl), le cobalt (Co), le molybdène (Mo) et le nickel (Ni).

Les fractions minérales et organiques du sol sont les principales sources de substances nutritives pour les plantes qui sont libérées dans la solution du sol.

6.3.1 Fraction minérale

La fraction minérale fournit un soutien aux racines de la plante dans le sol et libère lentement les nutriments dans la solution du sol. La fraction minérale est composée de matières différenciées par taille (Section 7.4):

- **le sable** a des particules d'une taille allant de 50 à 2000 μm (0,05–2,0 mm) de diamètre.
- **le limon** a des particules d'une taille allant de 2 à 50 μm (0,002– 0,05 mm) de diamètre.
- **l'argile** a des particules d'une taille <2 μm (<0,002 mm) de diamètre.

Les proportions de sable, de limon et d'argile déterminent la texture du sol (Figures 6.1 et 7.1). Par exemple, un sol sablo-limoneux contient beaucoup de sable, tandis qu'un sol limono-argileux contient principalement du limon et de l'argile. La texture du sol est une caractéristique très importante, car elle détermine, dans une large mesure, la dynamique de l'écoulement de l'eau dans le sol. Chacune des classes de texture illustrées dans le diagramme a des avantages et des inconvénients du point de vue de son utilisation dans l'agriculture.

Les sols contenant une forte proportion d'argile (appelés sols à texture lourde) sont difficiles à travailler, en particulier si la fraction d'argile comprend des argiles présentant le phénomène de retrait-gonflement. Les sols contenant une forte proportion de sable s'appellent sols à texture légère ou sols à texture grossière et sont plus vulnérables à la sécheresse que les sols plus argileux. La texture du sol peut être déterminée au laboratoire ou sur le terrain en frottant une petite quantité de sol humide entre un doigt et le pouce - le "test du toucher" (Figure 6.1).

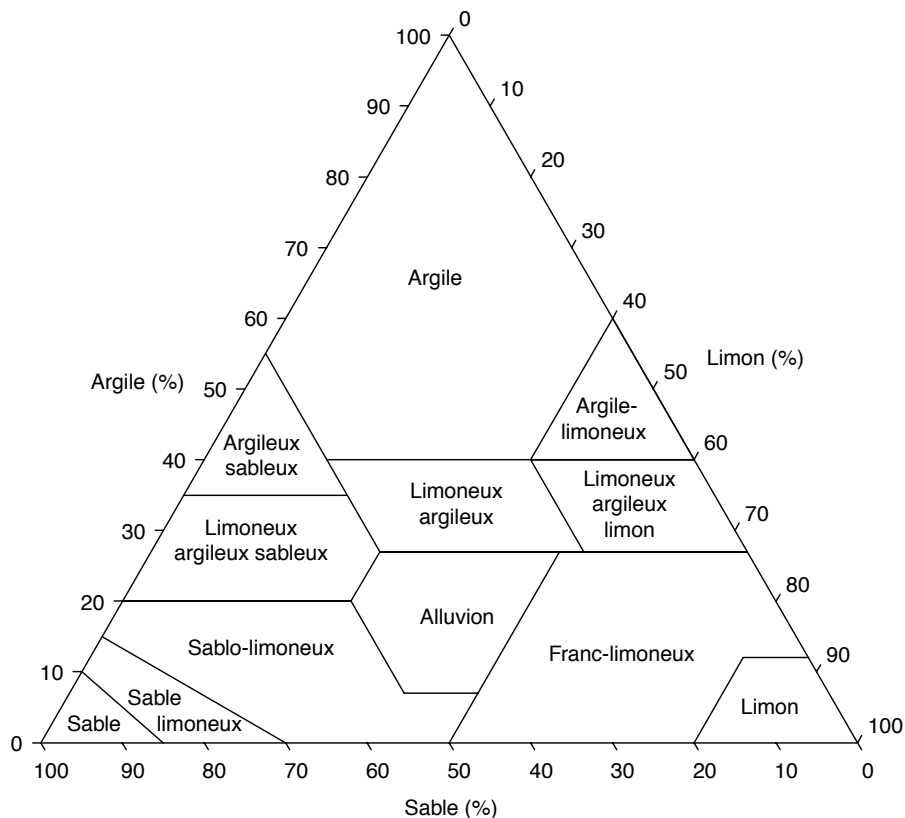


Figure 6.1 La texture des sols peut être déterminée dans le champ à l'aide du “test du toucher”.

La texture du sol influe sur le comportement des sols en termes de:

- capacité de rétention d'eau;
- rétention et apport d'éléments nutritifs;
- drainage; et
- lessivage des éléments nutritifs.

En général, le flux vertical de l'eau dans le sol (c'est-à-dire le taux d'infiltration de l'eau) est beaucoup plus élevé dans les sols sableux comparé aux sols argileux. Les nutriments sont contenus dans l'eau de percolation et peuvent donc être transportés en-dessous de la portée des racines de la plante.

La fraction argileuse et la matière organique du sol donnent au sol les moyens de conserver et libérer les éléments nutritifs. Les minéraux argileux et la matière organique du sol ont une grande surface par rapport à leur poids et certaines des surfaces ont une charge négative, en raison de la substitution des ions de silicium (Si) et d'aluminium (Al) dans le réseau d'argile par des cations (ions positifs) d'une charge positive inférieure. Ils peuvent, par conséquent, échanger des cations (ions positifs, tels que le potassium K^+ et l'ammonium NH_4^+). Cette capacité est appelée capacité d'échange cationique (CEC) et est exprimée en centimoles par kilogramme (cmol (+) /kg) de sol sec. En général, plus le sol est fertile, plus la CEC est élevée.

Dans des conditions exceptionnelles, les minéraux argileux peuvent aussi conserver des anions (ions négatifs), tels que les nitrates (NO_3^-) sur des sites chargés positivement. Cette capacité est appelée capacité d'échange anionique (CEA) et est exprimée en centimoles par kilogramme (cmol (+) /kg) de sol sec.

L'importance de la CEC dépend principalement de la teneur en argile, le type de minéral argileux, la quantité de matière organique du sol et le pH du sol (c'est-à-dire la mesure de l'acidité du sol, voir ci-dessous).

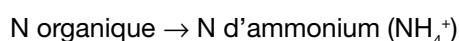
La principale différence entre les minéraux argileux réside dans leur structure:

- Les minéraux argileux 2/1 contiennent deux couches de silicate pour chaque couche d'oxyde ou hydroxyde d'aluminium et ont une grande capacité CEC (par exemple illite). Les minéraux 2/1 sont plus courants dans les sols fertiles des plaines (par exemple les champs de riz paddy).
- Les minéraux argileux 1/1 contiennent une couche de silicate par couche d'oxyde/hydroxyde d'aluminium et n'ont qu'une faible capacité CEC qui est dépendante du pH du sol (par exemple kaolinite): si le sol est acide, la CEC est petite. La plupart des sols de hautes terres en Afrique sub-saharienne contiennent principalement des minéraux argileux 1/1 qui ont une faible CEC dépendante du pH, et leur capacité à conserver ou à apporter des nutriments pour soutenir la croissance des cultures est intrinsèquement faible.

6.3.2 Fraction organique

La fraction organique n'est pas homogène dans le sol ou dans la matière organique du sol, mais se compose plutôt de résidus végétaux et animaux à différents stades de décomposition, allant des résidus de récolte ou du fumier de ferme fraîchement ajoutés à la matière organique du sol qui a été modifiée par l'activité biologique pour former de l'humus.

La matière organique contient d'importantes quantités de nutriments essentiels pour les plantes et est une source importante de N pour la croissance des plantes. L'azote contenu dans la matière organique du sol n'est pas immédiatement assimilable par les plantes, et il est progressivement libéré au cours de la décomposition. Le processus de libération des nutriments comporte deux étapes. Premièrement, les matières organiques subissent **la minéralisation**, par laquelle les matières organiques (résidus de récolte, fumier de ferme) sont converties en ammonium (NH_4^+) par l'action des champignons et des bactéries:



A la deuxième étape, les bactéries nitrifiantes (par exemple, Nitrosomonas et Nitrobacter) convertissent l'ammonium en ions nitrate qui peuvent être absorbés par les plantes dans un processus appelé **nitrification**:



Les principaux déterminants de la décomposition de la matière organique sont:

- la qualité des matières organiques affectées à la fois par le rapport C/N (c'est-à-dire le ratio du carbone par rapport à l'azote de la matière organique) et la teneur en lignine et en polyphénols composés;
- les conditions environnementales du sol telles que sa structure, sa teneur en humidité et sa température, son pH; et
- la population des micro et macro flore et faune du sol (c'est-à-dire les microbes, nématodes, champignons, bactéries) qui sont activement impliquées dans les transformations.

Les matières organiques qui contiennent une petite quantité de N par rapport à leur teneur en C (par exemple la paille) se décomposent plus lentement que les matières à forte concentration d'azote (par exemple le fourrage de légumineuses). C'est parce que les quantités de N contenues dans les matières ayant un ratio C/N élevé comme la paille ne sont pas suffisantes pour satisfaire les besoins des microbes impliqués dans la décomposition. La décomposition est retardée dans les matières organiques qui contiennent une grande proportion de lignine et de polyphénols (par exemple, les matières organiques "ligneuses").

La réalisation d'une étroite concordance (ou "synchronie") entre la libération de l'azote de la matière organique et l'absorption par la plante de l'azote libéré est un objectif important de la gestion des intrants organiques. Ceci parce que l'azote libéré de la matière organique du sol qui n'est pas absorbé par les cultures peut être lessivé de la couche supérieure du sol à une profondeur au-delà de la portée des racines des plantes.

La matière organique (résidu de récolte, fumier) ajouté au sol contient également d'autres éléments essentiels pour la plante tels que le P, Mg, Ca, S et les microéléments qui deviennent aussi disponibles pour l'absorption par la plante après décomposition. K n'est pas un composant structurel de la matière organique mais se retrouve dans

la sève des cellules de la plante et sont donc rapidement libérés lorsque les cellules se désagrègent dès le début de la décomposition. Le K de la matière organique peut être rapidement lessivé s'il est exposé à la pluie avant l'application au champ.

Dans les sols tropicaux, la teneur en matière organique du sol est un facteur important pour déterminer la CEC du sol, en raison de la libération de H^+ des éléments fonctionnels de la matière organique du sol, en fonction du pH de la solution du sol. Environ 55% de la matière organique du sol est constituée de carbone et une augmentation de 1 g/kg de la quantité de carbone organique du sol ajoute 0,4 cmol (+) /kg de CEC (à pH 7).

En plus de l'apport de nutriments et de l'amélioration de la CEC, la matière organique du sol offre les avantages suivants:

- Elle améliore la capacité de rétention de l'eau du sol, car elle peut retenir jusqu'à cinq fois son propre poids en eau.
- Elle améliore l'infiltration de l'eau dans le sol et donc améliore indirectement la rétention de l'humidité des sols et réduit les eaux de ruissellement.
- Elle fonctionne comme un tampon pour le pH du sol.
- Elle se lie à Mn et Al, réduisant ainsi leur concentration (et toxicité) dans la solution du sol.
- Elle améliore la structure du sol en stimulant l'activité de la flore et de la faune du sol qui produisent des agrégats du sol et donc indirectement réduit la vulnérabilité à l'érosion.

Les matières organiques, comme les résidus de cultures, peuvent également fournir une couche protectrice de paillis sur le sol qui réduit les pertes de sol par érosion. Néanmoins, les matières organiques ne sont pas souvent disponibles pour être utilisées comme paillis, parce que les agriculteurs les retirent du champ pour les utiliser comme aliments pour bétail. Le fumier d'origine animale est ensuite recyclé dans le champ comme une source d'éléments nutritifs.

Dans la plupart des sols tropicaux, la concentration de la matière organique dans le sol diminue fortement avec l'augmentation de la profondeur et donc une petite perte de sol de surface entraîne la perte d'une quantité disproportionnellement importante de matière organique du sol.

En raison de ses nombreux rôles, la matière organique du sol est un élément clé dans la gestion de la fertilité du sol et la baisse de la teneur en matière organique du sol constitue une menace à la viabilité d'un grand nombre de systèmes agricoles. La teneur en matière organique du sol est liée à la teneur en argile, parce que les particules d'argile peuvent protéger la matière organique du sol contre la décomposition et contribuer à accroître la quantité de la matière organique qui s'accumule dans le sol. Il est difficile d'augmenter la quantité de la matière organique du sol dans les sols à texture grossière contenant peu d'argile et dans les sols où la capacité de l'argile à protéger la matière organique du sol est déjà saturée. C'est pourquoi la GIFS met davantage l'accent sur la reconstitution de la matière organique du sol.

Dans le contexte de la GIFS, l'importance des matières organiques réside dans leur potentiel d'améliorer l'efficacité agronomique de l'utilisation des engrais.

6.4 Fonction des nutriments dans la production végétale

Une brève description de la fonction des éléments nutritifs dans la croissance végétale est fournie, car les symptômes visuels de la déficience en nutriments observés dans les champs sont souvent liés à la fonction de chaque élément nutritif dans la plante. Il est important de se rappeler que tous les nutriments essentiels sont nécessaires pour la production de cultures et que l'absence d'un seul nutriment donnera lieu à de mauvaises performances des cultures, même lorsque tous les autres éléments nutritifs sont disponibles ou fournis en quantités suffisantes.

Une clé est utile pour distinguer les carences en nutriments des problèmes de toxicités (Figure 6.2).

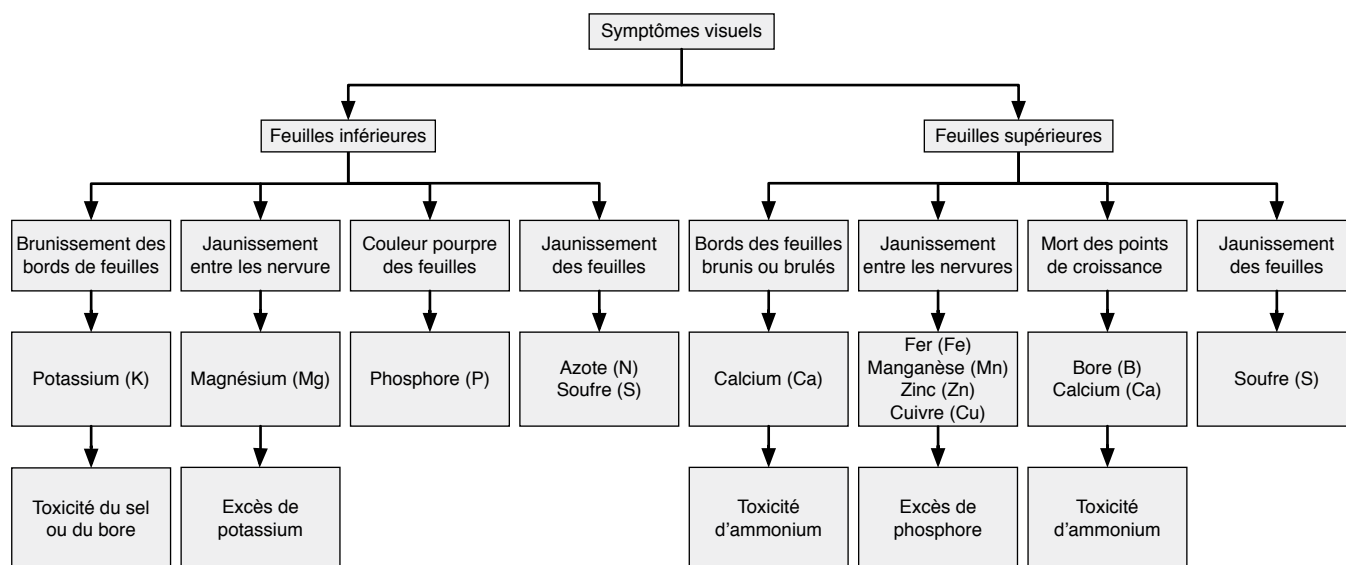


Figure 6.2 Symptômes visuels des déficiences en nutriments et des maladies. Les symptômes peuvent être provoqués par d'autres facteurs (par exemple, la sécheresse peut également provoquer le brunissement des bords de feuilles). La décoloration pourpre peut également être observée dans certaines variétés de céréales qui sont riches en anthocyanes. La carence en phosphore est souvent indiquée par le retard de croissance (par exemple, chez le maïs) et par une petite taille des feuilles (par exemple, chez les légumineuses).

6.4.1 Macronutriments

Un macronutriment est un élément nutritif qui constitue au moins 0,1 % de la matière sèche de la plante. La teneur totale en macronutriments d'une culture peut être supérieure à 4% de la matière sèche de la plante.

L'azote (N)

N est combiné avec C, H et O pour former les acides aminés, éléments de base des protéines et des enzymes. Il fait également partie de la molécule de chlorophylle et de plusieurs vitamines. N est requis pour la production de la matière sèche de la plante et la production de protéines dans les cultures à grains. Les plantes déficientes en N sont rabougries, et leurs feuilles les plus anciennes deviennent vert pâle-jaune en commençant par la pointe de la feuille, car N est transféré à des tissus plus jeunes. Les cultures déficientes en N atteignent la maturité prématurément entraînant une réduction de rendement. La teneur en protéines est réduite dans des cultures céréalières déficientes en N. N est absorbé par les végétaux sous forme d'ions de nitrate (NO_3^-) et d'ammonium (NH_4^+).

Le phosphore (P)

P joue un rôle majeur dans le stockage de l'énergie, il est une composante de l'ADN et il est requis pour la maintenance de la membrane de la cellule. P est nécessaire en grandes quantités là où la croissance des plantes a lieu (c'est-à-dire les pousses et bouts de racines). P est important pour le développement des racines et des fleurs et pour la production des semences et des fruits. P contribue à la résistance aux maladies et à la qualité de la culture. P est facilement transféré des tissus âgés aux tissus plus jeunes, provoquant l'apparition de symptômes de coloration sombre au bleu-vert sur les feuilles les plus âgées de certaines plantes. Quand la déficience est aiguë, une décoloration pourpre des feuilles et des tiges peut apparaître. Au fur et à mesure que les plantes deviennent matures, la plupart du P de la plante est transportée dans les graines et fruits. Lorsqu'il y a déficience en P, le développement racinaire et le tallage sont mauvais, la croissance des plantes est retardée, les plantes apparaissent rabougries, la maturité des cultures est retardée et la floraison et la fructification sont mauvaises. P est tiré de la solution du sol sous forme d'ions de H_2PO_4^- et de HPO_4^{2-} .

Le potassium (K)

K est contenu dans la sève de la cellule et sert de catalyseur pour l'activité de nombreuses enzymes impliquées dans le métabolisme des végétaux. K régule également la charge électrique où le transfert d'énergie se produit et affecte donc la synthèse des protéines. L'utilisation de l'eau de la plante est contrôlée par l'effet de la concentration variée en K sur les ouvertures des stomates des feuilles. K favorise également la translocation des sucres pour la croissance de la plante ou le stockage dans les céréales et les tubercules. K est requis pour la fixation atmosphérique de l'azote dans les légumineuses. K est également important pour la qualité des cultures (par exemple taille des grains) et la résistance aux maladies. Les plantes qui sont déficientes en K présentent la chlorose le long des bords des feuilles (brulure de la bordure de la feuille) plus âgées desquelles K a été transféré aux tissus plus jeunes. Les plantes qui sont déficientes en K sont rabougries et souvent plus sujettes à la verse et plus vulnérables à la sécheresse. K est assimilé par les plantes sous forme d'ions K^+ .

Le soufre (S)

S est un constituant des acides aminés et donc essentiel pour la formation des protéines. S est requis pour la synthèse de la chlorophylle et de certaines vitamines, ainsi que pour la fixation biologique de l'azote dans les légumineuses. Les jeunes feuilles des plantes déficientes deviennent jaune pâle, leur taux de croissance est réduit et leur maturité retardée. Les plantes assimilent le S dans le sol sous forme d'ions SO_4^{2-} .

Le magnésium (Mg)

Mg est un constituant de la chlorophylle et donc indispensable pour la photosynthèse. Mg active les enzymes et est requis pour le transport des glucides. Mg est mobile dans les plantes et les symptômes de déficience apparaissent comme une chlorose entre les nervures dans les feuilles âgées. Les tissus inter-nervures deviennent orange-jaune chez certaines plantes (par exemple, pomme de terre, soja). Mg est absorbé par les plantes sous sa forme ionique d'ions Mg^{2+} .

Le calcium (Ca)

Ca participe à la formation de la membrane de la cellule et active les enzymes impliquées dans la synthèse des protéines et le transfert des glucides et neutralise les acides organiques potentiellement toxiques, des sulfates et phosphates. Ca est essentiel pour la production de semences chez les plantes qui exigent beaucoup de calcium (appelées "plantes calcicoles") comme les arachides. Ca influe sur le mouvement de l'eau, la croissance et la division des cellules et il est nécessaire pour l'assimilation de N et d'autres minéraux. Ca affecte la croissance végétale indirectement lorsque les sols sont chaulés avec du $CaCO_3$. Étant donné que Ca n'est pas mobile dans les plantes, les symptômes de carence se manifestent sur les feuilles les plus jeunes et sur les bouts des feuilles et des racines. Parmi les symptômes liés à la déficience en Ca, il y a le retard de croissance des tiges, des fleurs et des racines, et les feuilles incurvées ou bombées avec des taches noires et des bordures jaunes. Ca est absorbé par les végétaux sous forme d'ions Ca^{2+} .

6.4.2 Oligoéléments

Un oligoélément est un élément nutritif qui constitue moins de 0,1 % de la matière sèche de la plante. Les carences en oligoéléments peuvent provoquer de mauvaises réponses aux macronutriments N, P et K. Les déficiences se manifestent lorsque les sols sont intrinsèquement pauvres en oligoéléments ou lorsqu'ils ont été dégradés. Les déficiences en oligoéléments sont souvent liées au pH du sol.

Le fer (Fe)

Fe est important pour la synthèse de la chlorophylle. Les plantes déficientes en Fe peuvent avoir des feuilles pâles et une chlorose inter-nervure (jaunissement) sur l'ensemble des feuilles. Fe est assimilé par les plantes sous forme d'ions Fe^{2+} et Fe^{3+} .

Le manganèse (Mn)

Mn est essentiel pour l'activité enzymatique. Les plantes déficientes en Mn présentent des symptômes qui sont semblables à ceux de la carence en Fe, soit des jeunes feuilles pâles et des nervures vertes. Parfois, des taches brunes, noires ou grises sont observées à côté des nervures des feuilles. Mn est assimilé par les plantes sous forme d'ions Mn^{2+} ou Mn^{3+} .

Le bore (B)

B est requis pour la synthèse des acides nucléiques, la germination du pollen et la croissance du tube pollinique. B favorise le développement racinaire, l'activité enzymatique et il est lié à la synthèse de lignine, le transport du sucre, la formation de la paroi de la graine et de la cellule, l'assimilation du calcium et les relations hydriques adéquates. Les plantes déficientes en B présentent des feuilles incurvées, cassantes et décolorées ou des fruits, tubercules et racines fissurés. Les symptômes des feuilles se trouvent généralement sur les pointes des feuilles. B est absorbé par les plantes dans le sol ou absorbé par les feuilles comme ions $(\text{BO}_3)^{3-}$.

Le zinc (Zn)

Zn joue un rôle dans la régulation de la croissance des plantes et la transformation des glucides. Il est nécessaire pour la synthèse des acides nucléiques et l'activation des enzymes. Les plantes déficientes en Zn présentent la chlorose inter-nervure à la base des jeunes feuilles (contrairement à la déficience en Fe où la chlorose inter-nervure se manifeste tout le long de la feuille). Zn est absorbé par les plantes sous forme d'ions Zn^{2+} .

Le cuivre (Cu)

Cu est un élément essentiel du système enzymatique qui utilise les glucides et les protéines et il est important pour la croissance reproductive. Les plantes déficientes en Cu peuvent présenter un flétrissement de la pointe des pousses et sur les feuilles âgées se développent des taches brunes. Cu est absorbé par les plantes sous forme d'ions Cu^{2+} .

Le molybdène (Mo)

Mo est nécessaire pour la synthèse des protéines et l'assimilation de l'azote. Il est également requis par les bactéries fixatrices d'azote dans les légumineuses. Les plantes déficientes en Mo ont des feuilles pâles avec des bordures roulées et des graines peuvent ne pas se former. Les plantes souffrant de la déficience en Mo peuvent également présenter des symptômes similaires à ceux de la carence en N. Mo est assimilé par les plantes sous forme d'ions Mo_4^{2+} .

Le chlore (Cl)

Cl est impliqué dans le mouvement de l'eau et des solutés dans les plantes. Il est important pour l'absorption de nutriments. Il joue également un rôle dans la photosynthèse. Lorsque les plantes sont déficientes en Cl, elles présentent un flétrissement des jeunes feuilles, des racines ventruées et un jaunissement des feuilles. On assiste rarement à la déficience en Cl parce qu'il se trouve dans l'atmosphère et dans l'eau de pluie. Cl est absorbé par les plantes sous forme d'ions Cl^- .

Le cobalt (Co)

Co est exigé par les bactéries fixatrices d'azote et sa carence aiguë peut provoquer chez les légumineuses des symptômes similaires à ceux de la déficience en N. Co est assimilé par les plantes sous forme d'ions Co^{2+} .

Le nickel (Ni)

Ni est nécessaire pour l'enzyme uréase qui décompose l'urée en formes de N qui peuvent être assimilées par les plantes, et pour l'absorption du Fe. Ni est assimilé par les plantes sous forme d'ions Ni^{2+} .

Le sodium (Na)

Na est important pour la régulation du mouvement de l'eau et de l'équilibre des minéraux dans les plantes. Na est absorbé par les plantes sous forme d'ions Na^+ .

Le silicium (Si)

Si est un composant majeur des parois des cellules et contribue à protéger les plantes contre les perforations par des insectes suceurs. Il améliore la présentation des feuilles, renforce la tolérance à la chaleur et à la sécheresse, et réduit la transpiration. Parmi les symptômes de déficience, il y a le flétrissement, peu de fruits et de fleurs, et une vulnérabilité accrue aux insectes et à la maladie. Si est absorbé par les plantes sous forme de $(\text{SiO}_4)^{4-}$.

6.5 Définition de la fertilité du sol

Nous pouvons définir la fertilité du sol comme suit:

La capacité du sol à fournir des quantités et des proportions suffisantes d'éléments chimiques essentiels (nutriments) et le volume d'eau requis pour assurer une croissance optimale des végétaux, tel que régi par les attributs chimiques, physiques et biologiques du sol.

Pour atteindre les objectifs de production des agriculteurs, les cultures ont généralement besoin de plus de nutriments que ceux qui peuvent être fournis par le sol. Par exemple, un sol considéré comme "fertile" dans son état naturel peut fournir des rendements de maïs d'un peu plus de 2 t/ha. Il sera nécessaire, cependant, pour l'agriculteur d'améliorer la fertilité du champ en apportant des nutriments sous la forme de résidus de récolte, d'engrais ou les deux à la fois pour atteindre un rendement de 5 t/ha. Cela démontre que la fertilité du sol est un terme *relatif* plutôt qu'*absolu*. Il est important d'examiner la question de savoir si un sol particulier va réagir à l'utilisation d'intrants pour améliorer la fertilité du sol et accroître les rendements. C'est cette réactivité à la gestion qui constitue souvent un critère majeur utilisé par les agriculteurs pour déterminer un sol "fertile". Les agriculteurs ne peuvent être sensibilisés à la possibilité d'*améliorer* la fertilité de leurs sols que lorsque l'effet de l'utilisation du germoplasme amélioré combiné avec une meilleure gestion des résidus de cultures et l'apport d'engrais minéraux a été démontré dans leurs propres champs!

Pour les besoins de production de cultures, la fertilité des sols devrait donc être considérée dans le contexte plus large de la productivité des sols, en mettant en perspective les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol car elles régulent l'apport de nutriments et d'eau, et assurent les autres conditions environnementales requises pour le développement de la plante.

La plupart des exploitations agricoles en Afrique sub-saharienne comportent un mélange de sols fertiles, infertiles et dégradés. La variabilité de la fertilité des sols au sein d'une même exploitation n'a pas fait l'objet d'assez d'attention dans le passé, mais elle constitue un élément clé de la GIFS.

6.6 Mesure de la fertilité des sols

Les chercheurs, les vulgarisateurs et les agriculteurs utilisent différentes méthodes pour évaluer la fertilité des sols. Les chercheurs et les vulgarisateurs recourent à des tests du sol effectués sur des échantillons prélevés dans un champ donné ou une partie d'un champ pour évaluer la fertilité du sol (Section 7.2). Les tests du sol sont exprimés en unités standard (Tableau 7.8) et peuvent être interprétés par rapport aux valeurs essentielles (Tableau 7.9).

Le prélèvement d'échantillons de sol et leur test ne sont utiles que lorsque:

- les échantillons de sol ont été recueillis après avoir pris en compte la variabilité de la fertilité des sols entre les différentes parties de l'exploitation apparue au cours de l'inspection des champs;
- un laboratoire fiable est utilisé pour analyser les échantillons; et
- une contre-vérification et des échantillons standards sont utilisés pour vérifier que les travaux d'analyse au laboratoire ont été effectués correctement.

Les agriculteurs utilisent généralement plusieurs indicateurs pour évaluer la productivité potentielle d'un sol, y compris:

- la végétation dominante comme indicateur indirect de la fertilité du sol;
- la présence d'une faune particulière du sol;
- la couleur comme indicateur de teneur en matière organique;
- la capacité d'apport de nutriments d'un sol (c'est-à-dire la fertilité) basée sur l'apparence des cultures, du semis à la maturité.
- les rendements des cultures, en fonction des récoltes précédentes sur plusieurs saisons;
- la capacité du sol à fournir de l'eau aux cultures basée sur l'apparence de cultures pendant les périodes de sécheresse; et
- la structure et la maniabilité, basées sur la facilité ou la difficulté de travailler le sol pendant la préparation des champs.

6.7 Conclusions

Le sol contient des constituants minéraux et organiques combinés avec l'activité biologique de la micro et macro flore et faune pour produire les moyens de croissance des cultures. Certaines caractéristiques, telles que la texture du sol, sont plus ou moins fixes, tandis que d'autres, comme la capacité du sol à stocker et à libérer les éléments nutritifs, sont fortement influencées par les pratiques de gestion de l'agriculteur. Toutes les cultures nécessitent un apport suffisant en nutriments minéraux, qu'ils soient fournis par le stock de nutriments du sol ou par des suppléments fournis sous forme d'intrants organiques et d'engrais minéraux.

Une explication de l'importance de la GIFS et comment elle peut contribuer au développement agricole et à l'amélioration des conditions économiques a fait l'objet des sections précédentes du présent manuel.

6.8 Liste d'ouvrages à lire

Cette liste sert de guide de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d'une explication *en italique*. Lorsque la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Il existe un grand nombre de textes de base en science du sol qui fourniront des informations de base utiles.

Gregory, P.J. and Nortcliff, S. (eds) (2012) *Soil Conditions and Plant Growth*. Wiley/Blackwell, Oxford

Un excellent texte de référence.

Marschner, H. (1995) *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London.

Mengel, K. and Kirkby, E.A. (2001) *Principles of Plant Nutrition*. Springer, Dordrecht.

Deux textes de référence sur la nutrition des plantes.



Photo 6.1 En principe, les fosses pédologiques doivent être creusées pour permettre un examen approfondi du profil du sol. Le profil du sol est également visible le long des sillons de drainage ou des routes.



Photo 6.2 Les échantillons de sol doivent être prélevés avec une tarière à l'aide d'un bon schéma d'échantillonnage.

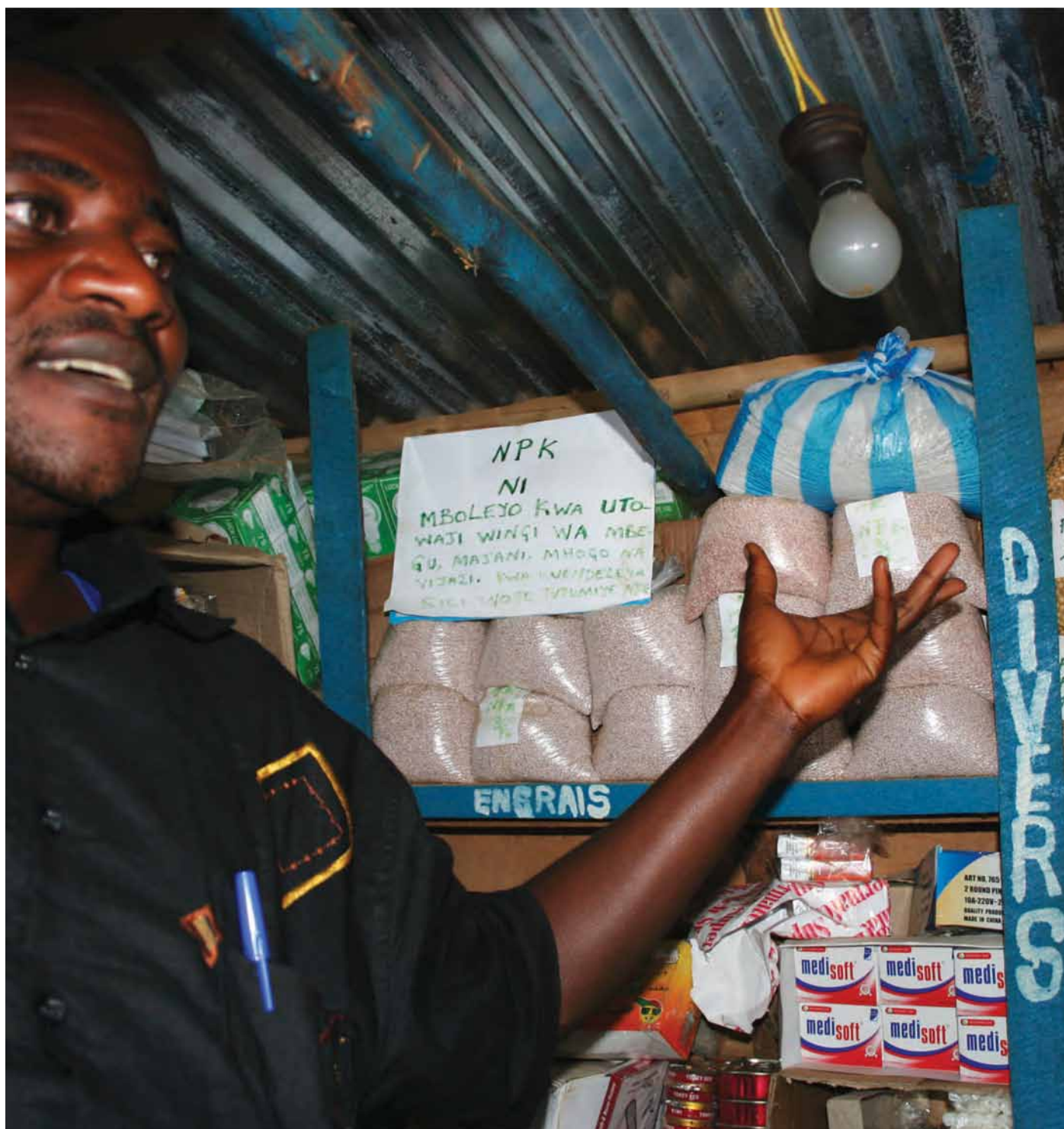


Photo 6.3 La détermination de la texture d'un sol au laboratoire est onéreuse. La texture peut aussi être déterminée à l'aide du "test du toucher".



Photo 6.4 La tarière Edelman est conçue pour prélever des quantités égales de sol de chaque profondeur échantillonnée.

7 Tableaux et Informations de référence



7.1 Introduction

Dans cette section vous trouverez des tableaux de référence sur:

- l'échantillonnage du sol;
- l'analyse des systèmes d'exploitation agricole;
- la gestion de la fertilité des sols;
- la nutrition des plantes;
- l'utilisation d'engrais;
- l'économie agricole; et
- les informations générales.

7.2 Echantillonnage du sol

L'échantillonnage du sol a pour but de fournir de la matière pour l'analyse des sols. Un échantillon représentatif est une condition préalable à la réussite d'une analyse des sols. Une couche de sol de 20 cm de profondeur pèse 2000–3000 t/ha. Un échantillon composite d'environ 0,5 kg est prélevé d'un champ, qui peut représenter <1 ha ou ≥30 ha.

Au laboratoire, une petite cuillère environ de sol (quelques grammes) est prélevée sur l'échantillon de 0,5 kg pour usage dans la procédure analytique (Figure 7.1). Les sols sont normalement hétérogènes et une grande variabilité peut exister même dans des champs qui sont apparemment uniformes. A moins que la procédure d'échantillonnage du champ ne soit convenablement exécutée, il y a une réelle possibilité que les données analytiques du sol ne soient pas représentatives du champ. La procédure suivie pour la collecte d'un échantillon représentatif peut se résumer comme suit:

- Vérifier la zone à analyser pour trouver des caractéristiques notables (par exemple, pente, types de sol, végétation, drainage).
- Faire un croquis, identifier et marquer l'emplacement des points de prélèvement.
- Éviter de prélever sur différents types de sol et d'usages de terre et à des endroits particuliers (par exemple, sur des amas de cendre et de fumier, des endroits réservés au battage, des endroits mouillés).
- Prendre un échantillon composite (25–30 sous-échantillons principaux) d'une zone circulaire d'environ 10–20 m de diamètre avant d'effectuer des prélèvements sur une autre zone.
- Chaque sous-échantillon doit être prélevé à l'entière profondeur d'échantillonnage (c'est-à-dire 0–20cm ou 20–40 cm).
- Chaque échantillon composite devrait être clairement identifié et correspondre au croquis ou à l'emplacement du champ (utiliser un appareil GPS pour accélérer ce processus et améliorer la précision).
- Mélanger soigneusement les échantillons composites et si nécessaire, réduire le poids des échantillons en les subdivisant (par exemple, en quartiers).
- Éviter toute contamination des échantillons par d'autres sols, outils d'échantillonnage, sacs de prélèvement, engrais, etc.

Un champ devrait être testé une fois tous les 3 ans et les échantillons devraient être prélevés juste avant le semis ou la plantation mais avant l'application d'engrais. Dans les systèmes de culture pérennes, les échantillons doivent être prélevés au cours de la même saison.

Les objectifs principaux de l'analyse des sols sont les suivants:

- permettre d'identifier les raisons d'un faible rendement des cultures (outil de diagnostic);
- donner un indice de la disponibilité ou provision de nutriments dans un sol donné;
- prédire la réponse aux amendements apportés au sol (par exemple la chaux) et à l'engrais;
- fournir une base pour les recommandations sur la quantité de nutriments à appliquer;
- aider à la préparation des budgets pour nutriments sur les cultures par champ ou par exploitation; et
- évaluer l'état de la fertilité d'un plus grand pédo-paysage.

L'analyse du sol est une méthode chimique pour estimer la capacité d'un sol à fournir des éléments nutritifs. Bien que l'analyse des plantes soit extrêmement importante pour le diagnostic du stress nutritif, l'analyse du sol est essentielle pour déterminer les besoins en éléments nutritifs d'une culture donnée.

Par rapport à l'analyse de la plante, le principal avantage de l'analyse du sol est sa capacité à déterminer l'état des nutriments du sol avant que la culture ne soit plantée. Toutefois, les tests du sol ne sont pas capables de prédire la quantité d'un nutriment qui sera assimilée par une culture. Pour prédire les besoins nutritifs des cultures, les résultats des analyses doivent être calibrés par rapport à l'assimilation des nutriments et au rendement des essais au champ.

Le matériel ci-après est utile pour l'évaluation de la fertilité du sol au champ:

- Le pH mètre portable (par exemple le Pehameter®, le pH-mètre FieldScout SoilStik®, le Kelway® servant à mesurer le pH et l'humidité du sol)
- La tarière de sol Edelman;
- La clé de texture du sol (par exemple, le diagramme de texturation du sol du Département américain de l'agriculture (USDA)); et
- Des sacs à échantillons et des étiquettes.

Source: Dierolf, T., Fairhurst, T. and Mutert, E. (2001) Soil Fertility Kit: A Toolkit for Acid, Upland Soil Fertility Management in Southeast Asia. Potash & Phosphate Institute (PPI), ProRLK, GTZ GmbH, Singapore.

7.3 Comment déterminer la densité apparente du sol

La densité apparente est le poids du sol pour un volume donné. Elle sert à mesurer le compactage et à corriger les mesures des matières organiques du sol en vue d'identifier les différences dans la densité apparente. En général, plus la densité est grande, moins il y a d'espace entre les pores pour le mouvement de l'eau, la croissance et la pénétration des racines, ainsi que la germination de jeunes plants.

Les mesures de la masse volumique devraient être prises à la surface du sol ou dans une zone compactée (par exemple une semelle de labour) s'il y en a. Plusieurs échantillons devraient être pris pour obtenir une mesure de la densité apparente représentative de la zone.

Une carotteuse cylindrique en métal ou en plastique de volume connu est enfoncée dans le sol à la profondeur souhaitée. L'échantillon intact est récupéré, séché dans un four à 105° C, et pesé.

$$\text{Densité apparente (mg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Poids du sol chauffé au four}}{\text{Volume du sol}}$$

7.4 Comment déterminer la texture du sol dans un champ

La fraction minérale du sol est divisée en trois portions suivant la taille des particules:

- **La taille** des particules de sable est de 50 à 2000 μm (0,05–2,0 mm) de diamètre. Le sable donne une sensation graveleuse au sol en raison de la forme des particules individuelles
- **La taille** des particules de limon est de 2 à 50 μm (0,002–0,05 mm) de diamètre. Humide, le limon donne une sensation farineuse et ne s'enrubanne pas quand pressé entre le pouce et l'index en raison de la forme des particules individuelles. Placé entre les dents, le limon donne une sensation graveleuse.
- **La taille** des particules d'argile est $<2 \mu\text{m}$ ($<0,002 \text{ mm}$) de diamètre. L'argile présente des propriétés colloïdales, a une charge négative, est plat et a une forme de plaque. L'argile humide est collante et s'enrubanne facilement lorsque pressé entre le pouce et l'index. Placé entre les dents, l'argile donne une sensation douce et lisse.

La texture du sol est estimée à partir de la sensation d'un sol humide (mais pas mouillé ou sec) en se servant d'une clé qui établit une distinction entre les principales classes de texture (Figure 7.1). Prendre une petite quantité de sol fraîchement labouré. Ajouter de l'eau et pétrir le sol jusqu'à ce que la structure en miette du sol soit brisée. Utiliser la clé pour identifier la classe de texture appropriée (Figure 7.1).

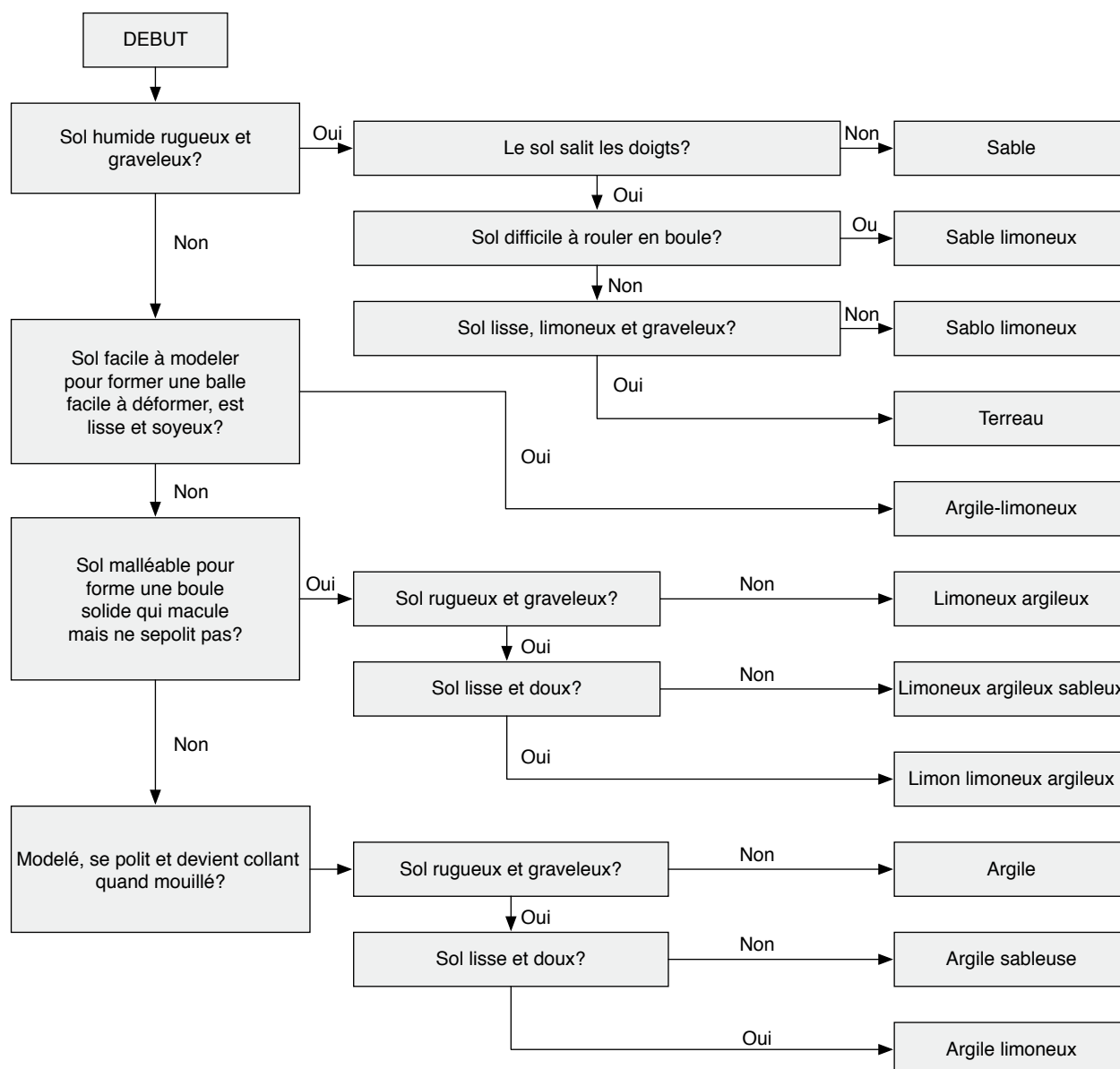


Figure 7.1 1 Clé pour faire la distinction entre les classes des textures principales du sol en se basant sur le 'test du toucher'.

7.5 Analyse des systèmes d'exploitation agricole

Tableau 7.1 L'amélioration de la GIFS est un processus qui comporte trois étapes clés.

Activité	Objectif
Diagnostiquer les problèmes majeurs de la fertilité des sols et identifier les voies et moyens d'améliorer la gestion de la fertilité des sols	
Analyse relative au ménage et à la parité entre les sexes: tâches et contrôle.	Déterminer qui fait quoi, afin que les membres de la famille les mieux placés soient impliqués.
Cartographier les flux nutritifs sur l'exploitation agricole.	Développer une compréhension globale du système d'exploitation agricole et du flux d'éléments nutritifs en son sein.
Gestion de la fertilité des sols par le ménage.	Comprendre les connaissances et pratiques de l'agriculteur.
Historique de la culture/fertilité.	Déterminer les effets possibles du système de gestion du passé sur la fertilité des sols.
Symptômes de déficience en nutriments.	Identifier les problèmes critiques de fertilité du sol qui ont besoin d'être corrigés.
Évaluer les pratiques de fertilité du sol.	Apprendre des pratiques actuelles qui pourraient être améliorées.
Diagnostic.	Déterminer les problèmes possibles de fertilité et les aspects de gestion qui pourraient être améliorés.
Faire des recommandations pour améliorer les pratiques actuelles	
Discuter et faire des recommandations.	Recommander les voies et moyens de surmonter les problèmes relatifs aux éléments nutritifs et améliorer les pratiques actuelles.
Sélectionner les recommandations.	Sélectionner la (les) recommandation(s) avec le ménage.
Tester, évaluer et faire le suivi des recommandations	
Tester les recommandations sur l'exploitation agricole.	Avec le ménage, choisir et mettre des traitements en pratique pour effectuer des essais dans les conditions de l'exploitation agricole.
Contrôler et évaluer le test avec l'agriculteur.	Évaluer les résultats du test avec le ménage.
Échantillonnage des récoltes.	Mesurer et comparer le rendement dans les différents traitements.
Budget partiel.	Calculer le coût et les avantages des différents traitements. Aider le ménage à adopter/adapter les résultats et à les partager avec d'autres ménages.
Faire un suivi du test de terrain avec l'agriculteur.	Faire une évaluation pour voir si les pratiques recommandées étaient appropriées.
Diffuser les résultats du test.	Discuter d'un projet d'action de suivi avec les autres agriculteurs du village.

Tableau 7.2 Utilisez cette liste de contrôle pour vous assurer que vous parlez à la personne appropriée en posant des questions relatives à la gestion de l'exploitation agricole et en choisissant les recommandations à tester.

Activité	Qui fait la tâche?				Qui prend les décisions?			
	M ^a	F	E	A	M	F	E	A
Engrais								
• Achète les engrais								
• Détermine les taux d'application								
• Applique l'engrais au moment du semis								
• Applique l'engrais d'entretien								
Bétail								
• Fait paître les animaux								
• Coupe/transporte le fourrage du champ								
• Nourrit le bétail à l'étable								
• S'occupe du fumier animal dans l'étable								
• Porte le fumier au champ								
• Applique le fumier à la culture								

à suivre

Tableau 7.2 Suite

Activité	Qui fait la tâche?				Qui prend les décisions?			
	M ^a	F	E	A	H	F	E	A
Cultures								
• Décide des cultures à cultiver								
• Prépare le sol pour le semis (labour, sarclage)								
• Gère les résidus de cultures (par exemple, entasse, ramène au champ)								
• Gère la paille de riz (par exemple, brûle, nourrit le bétail)								

^aM = mari, F = femme, E = enfants, A = autre.

Tableau 7.3 Questions à poser aux ménages pour comprendre les connaissances de l'agriculteur et mieux comprendre les pratiques de gestion de fertilité du sol utilisées sur son exploitation agricole.

Question	Comment utiliser cette information?
Quel est le statut foncier de vos champs?	Peut servir d'indication par rapport au montant que l'agriculteur est prêt à investir dans la gestion de la fertilité du sol (moins probable pour un agriculteur locataire).
Quelles sont les bonnes/mauvaises propriétés de votre sol?	Identifier la perception de l'agriculteur sur les caractéristiques du sol (fertilité, drainage, maniabilité).
Comment comparez-vous la fertilité de vos sols à celle d'autres exploitations agricoles dans le village/la région? Expliquez pourquoi.	Identifier le niveau général de fertilité.
Quelles cultures poussent mieux ici, sans nécessiter d'engrais supplémentaires?	Identifier le niveau général de fertilité.
Y a-t-il des cultures particulières qui ne poussent que sur certaines parties du champ? Pourquoi?	Identifier les parties fertiles et moins fertiles du champ.
La fertilité du sol a-t-elle augmenté, diminué ou est-elle restée la même ces 10 dernières années? Qu'est-ce qui vous l'indique?	Déterminer si les pratiques actuelles maintiennent la fertilité.
Faites-vous quelque chose pour empêcher l'érosion du sol et le ruissellement d'eau de surface?	Identifier si cela représente un problème et s'il peut être amélioré.
Que faites-vous pour améliorer la fertilité du sol? Pourquoi?	Comparer avec les principes décrits dans ce manuel.
A votre avis, quelles pratiques contribuent à la baisse de la fertilité du sol? Pourquoi?	Comparer avec les principes décrits dans ce manuel.

Tableau 7.4 Identifier les améliorations possibles aux pratiques de gestion de la fertilité du sol des agriculteurs.

Pratique	Oui/Non
Calendrier de fertilisation	
L'engrais est-il appliqué au bon moment?	
L'engrais est-il appliqué lorsqu'il y a suffisamment d'humidité dans le sol?	
Méthode d'applications de l'engrais	
L'engrais est-il incorporé dans le sol?	
L'engrais est-il placé près de la zone des racines de la plante?	
L'engrais est-il susceptible d'endommager la semence et/ou le jeune plant?	
Les engrais compatibles sont-ils mélangés?	
Fertilisation équilibrée	
Le nutriment le plus déficient est-il appliqué?	

à suivre

Tableau 7.4 Suite

Pratique	Oui/non
Gestion de la matière organique	
Les résidus de cultures sont-ils ramenés au sol?	
Les résidus/cendres sont-ils également répartis sur le champ?	
Si le bétail est nourri avec de la végétation qui était cultivée sur ce champ, le fumier est-il ramené au champ?	
Le fumier animal est-il appliqué au champ?	
Le fumier animal est-il convenablement stocké?	
Taux d'application d'engrais	
Les taux d'application recommandés sont-ils respectés?	
Autres pratiques	
Les mesures de conservation du sol ont-elles été prises?	
La fertilité du sol est-elle en train d'être renforcée?	
Des pratiques pour maintenir la fertilité des sols ont-elles été adoptées?	
Les animaux sont-ils intégrés dans les champs des hautes terres?	
Les arbres sont-ils intégrés dans les champs des hautes terres?	
Les légumineuses sont-elles intégrées dans les champs des hautes terres?	

Tableau 7.5 Utilisez ce tableau pour résumer les résultats de vos recherches sur l'utilisation d'engrais.

Question	Réponse
Quel est le nutriment dont la gestion a le plus besoin d'amélioration?	
Le calendrier d'application de l'engrais peut-il être amélioré?	
La méthode d'application d'engrais peut-elle être améliorée?	
L'équilibre entre les nutriments peut-il être amélioré?	
La gestion de la matière organique peut-elle être améliorée?	
La dose d'engrais peut-elle être améliorée?	
Y a-t-il d'autres pratiques qui peuvent être améliorées?	
1.	
2.	
3.	
4.	

Tableau 7.6 Exemples de problèmes relatifs à la gestion de la fertilité du sol et de recommandations pour l'amélioration des pratiques qui pourraient être identifiées lors de discussions avec les agriculteurs.

Problème	Recommandations
L'agriculteur applique les engrais au mauvais moment.	<ol style="list-style-type: none"> Améliorer le calendrier d'application d'engrais. <ul style="list-style-type: none"> Appliquer les engrais de P et K au moment du semis. Appliquer les engrais azotés par fractions selon l'étape de croissance de la culture.
L'agriculteur n'incorpore pas l'engrais.	<ol style="list-style-type: none"> Améliorer la méthode d'application de l'engrais. <ul style="list-style-type: none"> Incorporer l'engrais pour réduire les pertes par lessivage et volatilisation. Appliquer les engrais près de la zone des racines de la culture.
L'agriculteur applique de grandes quantités d'engrais azoté mais des quantités insuffisantes d'engrais P et K.	<ol style="list-style-type: none"> Introduire la fertilisation équilibrée. <ul style="list-style-type: none"> Appliquer les engrais P et K avec les engrais azotés en applications équilibrées (la quantité totale et le coût total des engrais augmentent). Réduire la quantité d'engrais azoté appliqué et augmenter la quantité d'engrais K et P appliqués (la quantité totale et le coût total des engrais restent les mêmes). Appliquer en une fois une grande quantité d'engrais P pour reconstituer la teneur du sol en P.

à suivre

Tableau 7.6 Suite

Problème	Recommandations
L'agriculteur brûle un grand tas de paille de céréales dans un coin du champ.	<p>4. Améliorer la gestion de la matière organique.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Etaler la paille avant de la brûler. • Etaler la cendre sur tout le champ avant de labourer. • S'organiser pour brûler dans différentes parties du champ pendant des saisons successives. • Ne pas brûler la paille; l'incorporer en préparant le champ pour la prochaine culture.
Les résidus sont enlevés du champ pour nourrir le bétail de l'agriculteur.	5. Ramener le fumier animal au champ.
Les taux d'engrais sont en-dessous de l'optimum économique.	<p>6. Optimiser les taux d'application d'engrais.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la quantité totale d'engrais appliqué.

Tableau 7.7 Consommation quotidienne et annuelle de matière sèche et production de fumier par les bovins, les caprins et les buffles

Espèces	Poids kg	Consommation requise de matière sèche		Fumier produit	
		kg/an	kg/jour	kg/an	kg/jour
Bovins (travail modéré)	350	11.000	30	2.700	7
Caprins (activité moyenne)	40	1.200	3	440	1
Buffles (travail modéré)	400	13.000	36	3.300	9

7.6 Gestion de la fertilité des sols

Tableau 7.8 Les unités et méthodes utilisées pour des analyses élémentaires du sol.

Paramètres du sol	Unités	Méthode utilisée
pH (eau)	pH	1:1 (sol:H ₂ O)
pH (KCl)	pH	1:1 (sol:1 M KCl)
C organique	%	Oxydation mouillée (Walkley et Black)
N total	%	Méthode de Kjeldahl
P disponible	mg/kg mg/kg	Méthode Bray II (molybdate bleu), spectrophotomètre Méthode d'Olsen
K échangeable	cmol/kg	1 M NH ₄ Cl, pH 7, photomètre à flamme
Na échangeable	cmol/kg	1 M NH ₄ Cl, pH 7, photomètre à flamme
Ca échangeable	cmol/kg	1 M NH ₄ Cl, pH 7, spectrophotomètre d'absorption atomique
Mg échangeable	cmol/kg	1 M NH ₄ Cl, pH 7, spectrophotomètre d'absorption atomique
Al échangeable	cmol/kg	1 M KCl méthode de titrage
H échangeable	cmol/kg	1 M KCl méthode de titrage
Capacité d'échange cationique effective (CECE)	cmol/kg	K+Na+Ca+Mg+Al+H échangeables
Saturation en Al	%	(Al échangeable/CECE) x 100
Sable	%	Méthode de la pipette
Limon	%	Méthode de la pipette
Argile	%	Méthode de la pipette

Tableau 7.9 Valeurs essentielles pour certaines propriétés physiques et chimiques des sols des hautes terres.

Propriété	Unités SI	Valeur	Commentaires
Sable	%	>50	Les pertes par lessivage risquent d'être élevées. Important de retourner les résidus de cultures pour réapprovisionner la matière organique du sol, améliorer la rétention de nutriments et la disponibilité de l'humidité du sol.
Argile	%	>45	Probabilité de problèmes de drainage. Grande capacité d'échange de cations si l'argile est composée de minéraux d'argile de type 2/1. Grande capacité pour améliorer la matière organique du sol.
Argile	%	<30	Faible teneur en nutriments. Faible rétention d'humidité du sol. Difficile d'augmenter la MOS.
pH (H ₂ O, 1:2,5 ou 1,5)	–	<4,5	Le chaulage pourrait être exigé. Aucun avantage du chaulage à pH>5,5.
pH (KCl, 1:2,5 ou 1:5)	–	<4,2	Le chaulage pourrait être exigé. Aucun avantage du chaulage à pH>5,5.
C organique	%	<1,5	Faible rétention de nutriments. Faible provision d'azote indigène. Mauvaises propriétés physiques du sol (par exemple, disponibilité d'humidité, maniabilité).
N total	%	<0,15	Faible provision d'azote indigène.
P total (25% HCl)	mg/kg	<200	Probabilité de déficience en P. Intrants P exigés (engrais, fumier de ferme).
P (Bray II)	mg/kg	<15	Probabilité de déficience en P. Intrants P exigés (engrais, fumier de ferme).
Capacité d'échange de cations efficace	cmol/kg	<10	Mauvaise rétention cationique. La MOS est une source importante d'échange de cations.
K échangeable	cmol/kg	<0,2	Déficience en K probable. Intrants K exigés (engrais, fumier de ferme).
Mg échangeable	cmol/kg	<0,2	Déficience en Mg probable. Intrants Mg exigés (engrais, fumier de ferme).
Ca échangeable	cmol/kg	<0,5	Probabilité de déficience en Ca. Intrants Ca exigés (engrais, fumier de ferme).

Tableau 7.10 Effets majeurs du pH dans le sol.

Facteur	Effet
Toxicité de l'Al	La toxicité de l'Al diminue avec l'augmentation du pH.
Disponibilité du P	La disponibilité du P est plus grande à partir du pH 5,5 à 7.
Disponibilité des micro-nutriments (nutriments requis en petites quantités par les plantes)	Tous les oligo-nutriments, sauf Mo, sont plus disponibles à partir du pH 5,5 à 6 (la toxicité de Mn et Fe est réduite dans cette gamme).
Capacité d'échange cationique (la capacité d'un sol à conserver les cations tels que Ca, Mg, K)	La capacité d'échange de cations augmente avec l'augmentation du pH dans les sols extrêmement fatigués. Cela signifie que le sol est capable de retenir plus de Ca, Mg et K, qui autrement seraient perdus par lessivage.
Minéralisation de l'azote (la libération de l'azote de sa forme organique à des formes que les plantes peuvent utiliser)	Les organismes du sol requis pour la minéralisation de l'azote fonctionnent le mieux à un pH du sol de 5,5–6,5.
Fixation de N ₂ (la conversion de N ₂ de l'atmosphère dans des formes qui peuvent être utilisées par les plantes)	Les nodules fixatrices de N ₂ se forment moins et fonctionnent moins efficacement à un pH > 5.
Maladie	Quelques maladies peuvent être contrôlées en manipulant le pH du sol (par exemple, les incidences de gale de la pomme de terre diminuent quand le pH décroît).
Dissolution du phosphate naturel (PN)	Le pH du sol doit être <5,5 pour que le PN se dissolve et libère le P pour la consommation de la plante.

Tableau 7.11 Effet de certaines pratiques de gestion sur la matière organique du sol (MOS).

Pratique	Effet
Réduire l'érosion du sol	Réduit les pertes en MOS.
Réduire l'intensité du labour	Taux plus lent de décomposition de la MOS.
Qualité du résidu (la proportion de C/N)	Les résidus avec une large proportion de C/N (par exemple la paille de riz) sont moins efficaces que ceux avec une proportion faible de C/N (par exemple les feuilles d'arachide) dans le maintien de la MOS. Une bonne partie du carbone dans les résidus pauvres en azote est oxydée et libérée sous forme de CO ₂ , et par conséquent la quantité de MOS créée est faible.
Résidus de récolte ramenés au champ	Fournit de la matière première pour la reconstitution de la MOS. Si les résidus sont requis pour nourrir le bétail, le fumier animal devrait retourner au sol.

Tableau 7.12 Facteurs importants de gestion des macronutriments dans les sols des hautes terres.

Nutriment	Important facteurs de gestion
Azote	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les pertes par lessivage. • Augmenter la fixation biologique de l'azote atmosphérique. • Maintenir ou augmenter la MOS. • Utiliser les engrais azotés efficacement. • Ramener les résidus de cultures au champ. • Ne pas brûler les résidus de cultures.
Phosphore	<ul style="list-style-type: none"> • Ajouter P au sol comme engrais. • Maintenir la MOS. • Augmenter l'efficacité de l'utilisation du P en appliquant les engrais P avec les résidus organiques facilement décomposables et le fumier animal.
Potassium	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les pertes par lessivage. • Ramener au champ les résidus de cultures et le fumier animal du bétail nourri avec le fourrage pris du champ. • Ajouter l'engrais K au sol.
Magnésium	<ul style="list-style-type: none"> • Ramener au champ les résidus de cultures et le fumier animal du bétail nourri avec le fourrage pris du champ. • Ajouter l'engrais Mg ou la dolomie au sol.
Calcium	<ul style="list-style-type: none"> • Ramener au champ les résidus de cultures et le fumier animal du bétail nourri avec le fourrage pris du champ. • Ajouter les engrais de Ca ou de la chaux au sol.
Soufre	<ul style="list-style-type: none"> • Ramener les résidus de récolte. • Maintenir la MOS. • Ne pas brûler les résidus de cultures.

Tableau 7.13 Sources d'éléments nutritifs pour la réhabilitation des sols.

Source	Avantage	Inconvénients
Engrais minéraux et chaux.	Facile à transporter et à appliquer. Effet rapide.	Coûteux. Peuvent ne pas être disponibles localement dans des zones reculées.
Fumier animal, résidus de compost et de cultures obtenus hors de la ferme.	En plus des nutriments, les fumiers organiques fournissent du matériel pour la reconstitution de la MOS.	Peuvent ne pas être disponibles localement ou en quantités insuffisantes. Peuvent être très coûteux. Difficiles à manier et à transporter.
Fixation biologique de N ₂	N ₂ atmosphérique est fixée et amenée au sein de l'exploitation.	L'engrais P et K pourrait s'avérer nécessaire pour augmenter la fixation biologique de l'azote des sols acides et de ceux des hautes terres.

à suivre

Tableau 7.13 Suite

Source	Avantage	Désavantage
Précipitations	Nutriments ajoutés sans aucun coût.	Quantités insuffisantes.
Les nutriments contenus dans le ruissellement de surface et dans les sols érodés arrivant sur l'exploitation.	Nutriments ajoutés sans aucun coût.	La ferme du voisin est devenue érodée, ce qui a réduit la stabilité de la communauté agricole.
Les nutriments consommés par des cultures ou plantes à racines profondes et déposés à la surface du sol à travers les débris de feuilles et les résidus de récoltes.	Les nutriments pourraient être ajoutés sans aucun coût.	Difficile de trouver une espèce de plante adaptée dont les produits sont commercialisables et les racines tolérantes à la toxicité à l'Al. La quantité d'éléments nutritifs dans le sous-sol est très petite.

Tableau 7.14 Quelques mythes et faits sur la gestion de la fertilité biologique du sol

Mythe	Fait
La végétation des jachères ajoute des nutriments au sol.	Ayant convenablement formé des nodules, les espèces de légumineuses fixatrices de N ₂ des jachères ajoutent de l'azote au sol par le pourrissement des racines et les résidus de surface. Les autres nutriments (P, K et Mg) sont recyclés, donc ne sont pas ajoutés.
Les nutriments sont ajoutés au sol par l'élagage des haies des allées et des bandes de contour.	La végétation des haies retourne des nutriments au sol qui pourraient avoir été absorbés en dessous de la zone racinaire de la culture.
Les légumineuses qui poussent dans un système de cultures intercalaires fournissent de l'azote à la culture compagne.	En fixant une partie de l'azote dont elles ont besoin, les légumineuses économisent l'azote du sol pour que les plantes non-fixatrices de N ₂ puissent en bénéficier.
La quantité de la matière organique du sol (MOS) est accrue quand on remet les résidus de cultures au sol.	Le carbone rendu au sol sous forme de résidus de cultures ne peut pas suffire pour remplacer la MOS épuisée des terres agricoles en raison de la décomposition. Rendre les résidus de cultures au sol pourrait réduire le taux de diminution de la MOS dans les sols cultivés.

Tableau 7.15 Méthodes visant à surmonter les facteurs de fertilité du sol qui inhibent la fixation de N₂.

Facteur inhibant la fixation de N ₂	Recommandation
Quantité élevée de l'azote du sol	Soit ne pas appliquer l'azote de démarrage, soit n'appliquer que de petites quantités (<10 kg/ha d'engrais azoté) aux légumineuses au moment du semis.
Faible quantité de P du sol	Appliquer l'engrais P dans la zone racinaire des cultures.
Faible pH du sol (<5-5,5), à l'exception du niébé	Appliquer la chaux sur la zone racinaire des cultures.
Faible quantité de Mo du sol (nodules grandes et vertes à l'intérieur, mais inactives)	Appliquer de l'engrais contenant du Mo.

Tableau 7.16 Genre de légumineuse et rhizobium compatible.

Genre de rhizobium	Type de plante	Genre de légumineuse inoculée
<i>Bradyrhizobium</i> (rhizobium « à croissance lente »)	Couverture végétale Légumineuses à graines Arbres fixateurs d'azote	<i>Calopogonium</i> , <i>Centrosema</i> , <i>Desmodium</i> , <i>Pueraria</i> , <i>Stylosanthes</i> <i>Arachis</i> , <i>Cajanus</i> , <i>Glycine</i> , <i>Phaseolus</i> , <i>Vigna</i> <i>Acacia</i> , <i>Prosopis</i>
<i>Rhizobium</i> (rhizobium « à croissance rapide »)	Légumineuses à grains Arbres fixateurs d'azote	<i>Cajanus</i> , <i>Phaseolus</i> <i>Calliandra</i> , <i>Gliricidia</i> , <i>Leucaena</i> , <i>Prosopis</i> , <i>Sesbania</i>

Tableau 7.17 Principes et méthodes pour réduire l'érosion des sols.

Principes	Méthodes
Réduire le détachement des particules du sol	
Protéger le sol de l'impact direct des gouttes de pluie	Appliquer un paillis et utiliser des résidus de cultures et des feuilles d'arbre.
Réduire la force des gouttes de pluie	Les feuilles permettent de réduire la force de l'impact d'une goutte de pluie à la surface du sol. Pour cette raison, maintenir une couverture végétale continue au-dessus du sol peut permettre de réduire l'érosion.
Réduire le transport du sol	
Réduire la vitesse de l'eau ^a	Raccourcir la longueur de la pente. Plus la pente est longue, plus vite l'eau se déplace. Par exemple, doubler la longueur d'une pente de 9% a doublé la perte de sol. Utiliser des barrières physiques comme des bandes enherbées, résidus de cultures, souches d'arbres, rondins et arêtes de terrasses. Réduire la raideur de la pente avec les terrasses naturelles formées de murs de rétention en pierre, barrières enherbées et murets de contour.
Augmenter l'infiltration de l'eau	Mélanger les résidus de cultures avec le sol. Appliquer du fumier animal pour améliorer la structure du sol. Ceci peut augmenter la quantité d'infiltration d'eau et réduire la quantité d'eau qui coule sur la pente. Former une surface rugueuse en exécutant un léger labour. Appliquer les résidus de cultures.

^aEn divisant par deux la vitesse de l'eau qui coule sur la pente:

- la taille maximum de particule qu'elle transporte est réduite de 64 fois;
- le pouvoir érosif de l'eau est réduit de quatre; et
- la quantité du matériel qui peut se déplacer dans l'eau est réduite de 32 fois.

Tableau 7.18 Teneur en éléments nutritifs (%) du fumier et des résidus couramment disponibles en Afrique subsaharienne.

Matière	Eau	C	N	P	K	Ca
Matières fécales humaines	–	–	1,0	0,2	0,3	–
Matières fécales bovines	–	–	0,3	0,1	0,1	–
Matières fécales porcines	–	–	0,5	0,2	0,4	–
Fumier frais de bétail	60	8–10	0,4–0,6	0,1–0,2	0,4–0,6	0,2–0,4
Fumier composté de bétail	35	30–35	1,5	1,2	2,1	2
Fumier de ferme	50	–	1,0	0,8	1,2	0,8
Fumier de chèvre	50	–	0,8	0,7	1,5	0,8
Fumier de mouton	50	–	1,0	0,7	1,5	1,7
Fumier de cochon	80	5–10	0,7–1,0	0,2–0,3	0,5–0,7	1,2
Fumier de volaille	55	15	1,4–1,6	0,25–0,8	0,7–0,8	2,3
Compost de déchets	40	16	0,6	0,2	2,3	1,1
Boue d'épuration	50	17	1,6	0,8	0,2	1,6
Bagasse de canne à sucre	75–80	8	0,3	0,2	0,06	0,5
Tourteau de ricin	10	45	4,5	0,7	1,1	1,8

7.7 Nutrition des cultures

Tableau 7.19 Symboles et masses atomiques des éléments qui jouent un rôle dans la nutrition de la plante.

Nom	Symbole	Masse atomique	Nom	Symbole	Masse atomique
Aluminium	Al	26,79	Manganèse	Mn	54,93
Bore	B	10,82	Molybdène	Mo	95,95
Calcium	Ca	40,08	Azote	N	14,01
Chlore	Cl	35,46	Nickel	Ni	58,69
Cobalt	Co	58,94	Oxygène	O	16,00
Cuivre	Cu	63,57	Phosphore	P	30,89
Fluor	F	19,00	Potassium	K	39,10
Hydrogène	H	1,01	Sodium	Na	23,00
Iode	I	126,92	Soufre	S	32,06
Fer	Fe	55,85	Zinc	Zn	65,38
Magnésium	Mg	54,93	Silicium	Si	28,06
Carbone	C	12,01	Sélénium	Se	78,96

Tableau 7.20 Fonctions des nutriments essentiels des cultures (autres que C, H et O) et leur mobilité relative dans les plantes et les sols.

Nutriments essentiels des plantes	Fonctions et rôles importants dans la plante	Matière sèche (%) des plantes	Mobilité ^a	
			Plante	Sol
Macronutriments				
Azote (N)	Formation de protéine, photosynthèse.	1,5	5	5
Phosphore (P)	Stockage/transfert d'énergie, croissance racinaire, maturité des cultures, enrichissement de la paille, résistance aux maladies.	0,2	5	1
Potassium (K)	Entretien de la pression de turgescence de la plante, accumulation et transport des produits du métabolisme de la plante, résistance de la culture aux maladies.	1,0	5	3-4
Magnésium (Mg)	Photosynthèse.	0,2	5	2
Soufre	De nombreuses fonctions. Dans des composés qui produisent l'odeur des oignons.	0,1	2	5
Calcium (Ca)	Croissance de la cellule et de sa membrane. Requis par l'arachide pour le développement de la graine.	0,5	1	2-3
Micronutriments				
Chlorure (Cl)	Photosynthèse, maturité précoce de la culture, contrôle des maladies.	0,01	5	5
Fer (Fe)	Photosynthèse et respiration.	0,01	2	2
Manganèse (Mn)	Photosynthèse, fonction d'enzyme.	0,005	-	2
Bore (B)	Développement/croissance de nouvelles cellules.	0,002	1	3
Zinc (Zn)	Activité enzymatique.	0,002	2	2
Cuivre (Cu)	Formation de chlorophylle et semence, synthèse des protéines.	0,0005	2	2
Molybdène (Mo)	Fixation de N ₂ par la légumineuse, réduction de nitrate.	0.00001	2	2

^a1 = mobilité faible, 5 = très mobile. Comparer la mobilité au sein de chaque colonne.

Tableau 7.21 Exportation de nutriments par des céréales, tubercules, légumineuses vivrières et cultures fourragères sélectionnées.

Culture	Produit	Export (kg/t de produit de récolte)					
		N	P	K	Mg	Ca	S
Céréales							
Maïs hybride	Grain	15,6	2,9	3,8	0,4	0,9	1,3
Maïs local	Grain	16,0	2,8	4,0	0,4	0,8	1,2
Riz amélioré	Grain	15,0	2,8	3,8	0,3	1,0	0,8
Riz local	Grain	15,0	2,5	2,5	0,5	1,0	0,5
Sorgho	Grain	16,5	3,5	3,8	1,9	0,4	1,2–1,6
Mil	Grain	26,6	3,5	4,4	1,3	0,1	1,2
Tubercules							
Manioc	Racines	1,7	0,5	2,5	0,4	0,2	0,2
Taro	Tubercules	3,0	0,6	2,9	0,3	0,4	0,3
Pomme de terre	Tubercules	2,7	0,3	3,6	0,3	0,3	0,3
Patate douce	Tubercules	3,8	0,5	5,3	0,4	0,5	0,3
Igname	Tubercules	1,5	0,4	2,5	0,2	0,1	0,1
Légumineuses vivrières							
Haricots	Gousse	28,3	3,0	14,0	2,0	1,3	1,0
Niébé	Grain	55,0	5,0	21,0	4,0	4,0	6,0
Arachide	Grain	32,0	3,2	4,8	1,6	1,6	1,2
Haricot mungo	Grain	55,0	4,0	17,0	4,0	3,0	2,0
Soja	Grain	50,0	4,0	15,3	2,7	2,7	2,0
Cultures fourragères							
Graminées	Matière sèche	30,0	3,7	26,7	7,2	5,0	4,2
Légumineuses	Matière sèche	37,5	4,4	33,3	13,4	5,3	5,0

Tableau 7.22 Carences communes en nutriments dans les sols acides des hautes terres et leurs effets sur la croissance des cultures.

Etat du sol	Effet sur la croissance des cultures
Faible quantité de phosphore dans le sol	De nombreuses cultures, surtout les légumineuses, ne poussent pas bien dans des sols à faible quantité de phosphore. D'ordinaire, le phosphore doit être ajouté sous forme d'engrais minéral tels que le TSP ou le phosphate naturel. Quand il est prévu que les systèmes de culture devront s'appuyer sur la fixation biologique de l'azote, la déficience en P limite souvent indirectement l'approvisionnement de l'azote aux cultures.
Faible quantité d'azote dans le sol	La réserve de l'azote du sol dépend de la quantité de la matière organique du sol (MOS). Plus la quantité de MOS est élevée, plus la quantité de N que le sol peut fournir aux plantes est élevée. Une faible quantité d'azote du sol réduit la croissance de toutes les plantes non-légumineuses (par exemple les céréales), et presque toutes les cultures profitent d'apport d'engrais azoté.
Faible quantité de potassium dans le sol	Le potassium devient généralement insuffisant dans des sols qui ont été cultivés pendant plusieurs saisons ou plusieurs années sans usage d'engrais de K, comme le KCl. Pour de nombreuses cultures, la grande quantité de K prise par la plante est contenue dans les résidus des cultures et par conséquent la carence en K est plus susceptible de se produire au cas où les résidus des récoltes sont retirés du champ.
Faible quantité de calcium dans le sol	Beaucoup de cultures peuvent pousser dans des sols à faible quantité de Ca, mais certaines cultures (par exemple, l'arachide) ne forment pas de gousses convenablement développées dans des sols à faible quantité de Ca. Le calcium est généralement appliqué par le biais de matériaux de chaulage comme la chaux agricole, la calcite ou la dolomie.

à suivre

Tableau 7.22 Suite

Etat du sol	Effet sur la croissance des cultures
Faible quantité de magnésium dans le sol	Généralement, le magnésium ne devient un problème que dans les sols qui ont été cultivés pendant plusieurs saisons ou années sans apport d'engrais au Mg (par exemple, la dolomie, langbéinite et kiesérite). La déficience en Mg est plus courante dans les cas où les résidus de cultures sont enlevés du champ.
Faible quantité de micronutriments dans le sol (Zn, B, etc.)	Les micronutriments sont des nutriments qui sont requis par la plante en quantités relativement petites. La correction de carences en micronutriments devient d'ordinaire plus importante si un champ a été intensivement cultivé pour plusieurs années sans apport de micronutriments.

Tableau 7.23 Quelques conditions dans lesquelles les nutriments peuvent limiter la croissance des cultures dans les sols acides des hautes terres.

Nutriment	Conditions où le nutriment devient limitant.
P	La plupart des sols des hautes terres qui n'ont pas reçu des quantités significatives d'engrais P.
N	Quand de grandes quantités de paille ont été appliquées; quand l'état de la MOS est mauvais; ou quand des cultures très exigeantes en engrais azoté, non-fixatrices d'azote (par exemple, le maïs, le riz) sont cultivées sans engrais.
K	Quand un sol a été cultivé pour plusieurs saisons avec très peu ou pas d'ajout d'engrais K (ceci arrive plus facilement quand les résidus de cultures ne sont pas remis au sol); quand les engrais contenant du Ca sont appliqués.
Mg	Idem que pour le K.
S	Quand les résidus de cultures ne sont pas retournés au sol; quand les minéraux contenant du S ne sont pas appliqués (par exemple, le sulfate d'ammonium, la langbéinite, la kiesérite et la dolomie).
Ca	La formation de graines est souvent faible pour les arachides plantées sur des sols acides.

Tableau 7.24 Identification de problèmes nutritifs. Plus vous répondez "oui" pour un nutriment, plus il est probable que sa gestion soit améliorée.

Critères	Oui/Non
Déficience en N	
Des symptômes de déficience en nutriments N sont-ils présents?	
Le bilan nutritif indique-t-il le retrait de l'azote?	
Les cultures non-légumineuses sont-elles d'habitude plantées?	
Les rendements des cultures sont-ils plus bas que les rendements moyens de la région?	
Déficience en P	
Des symptômes de déficience en nutriments P sont-ils présents?	
De grandes applications de P ont-elles été faites pendant les 5 dernières années?	
Le bilan nutritif indique-t-il que plus de P est retiré qu'appliqué?	
Les rendements de cultures sont-ils plus bas que les bons et moyens rendements de la région?	
Le pH du sol est-il <5,5?	
Déficience en K et/ou Mg	
Des symptômes de déficience en nutriments K et/ou Mg sont-elles présentes?	
Les résidus de cultures sont-ils d'ordinaire enlevés ou ne sont pas répartis équitablement sur le champ?	
Le champ a-t-il été cultivé pendant plusieurs années?	
Le bilan nutritif indique-t-il le retrait de K et/ou Mg? Les rendements de récoltes baissent-ils constamment?	
Les rendements de récoltes baissent-ils constamment?	
Y a-t-il un rapport important entre les quantités échangeables de Ca et de Mg dans le sol?	

Tableau 7.25 Caractéristiques des carences en nutriments pour les feuilles.

Nutriment	Localisation sur la plante	Chlorose?	Nécrose en bordure des feuilles?	Forme et couleurs de la feuille
N	Toutes les feuilles	Oui	Non	Jaunissement des feuilles et des nervures
P	Feuilles âgées	Non	Non	Taches violacées
K	Feuilles âgées	Oui	Oui	Taches jaunes
Mg	Feuilles âgées	Oui	Non	Taches jaunes
Ca	Jeunes feuilles	Oui	Non	Feuilles déformées
S	Jeunes feuilles	Oui	Non	Feuilles jaunes
Mn, Fe	Jeunes feuilles	Oui	Non	Chlorose entre les nervures
B, Zn, Cu, Ca, Mo	Jeunes feuilles	-	-	Feuilles déformées

Tableau 7.26 La mobilité des nutriments dans la plante et le sol peut servir à comprendre les systèmes de déficience en nutriments pour les plantes, et la gestion de l'engrais dans les sols.

	Moins mobile	Plus mobile
Plante	Les symptômes de déficience apparaissent d'abord sur les plus jeunes feuilles (S, Ca, Zn, Fe, Cu, B). Quand l'assimilation de nutriments est limitée, les nutriments moins mobiles ne se déplacent pas des plus vieilles feuilles pour soutenir la croissance de nouvelles feuilles plus jeunes.	Les symptômes de déficience apparaissent d'abord sur les plus vieilles feuilles (N, K, P, Mg) Quand l'assimilation de nutriments est limitée, plus de nutriments mobiles sont déplacés des plus vieilles feuilles pour soutenir la croissance des plus jeunes feuilles.
Sol	Moins de nutriments mobiles sont plus susceptibles de rester à proximité de l'endroit où ils ont été appliqués, sauf si les particules du sol sont mélangées physiquement par le labour ou emportées par le vent ou l'eau (P).	Plus de nutriments mobiles sont plus facilement perdus suite au lessivage et à la volatilisation (N, K, Mg, Ca). Il faut veiller à réduire les pertes de ces nutriments.

Tableau 7.27 Comparaison de l'exportation d'éléments nutritifs dans des variétés locales et améliorées.

Culture	Rendement (t/ha)		Grain (kg/ha)			Paille (kg/ha)		
	Grain	Paille	N	P	K	N	P	K
Variété de riz améliorée	4	4	48	10	24	24	6	160
Variété de riz locale	1	2	18	4	5	12	1	50
Différence	3	2	30	6	19	12	5	110

Table 7.28 Il existe trois catégories principales de disponibilité des nutriments, tous les éléments nutritifs dans un champ de hautes terres ne peuvent pas être immédiatement utilisés par les plantes.

Disponibilité	Période de disponibilité pour les plantes	Exemples
Facilement disponibles pour les plantes.	Immédiatement ou pendant la campagne agricole en cours.	Les nutriments contenus dans des engrais solubles (par exemple KCl), la MOS facilement minéralisée, les nutriments attachés sur les bords des particules du sol, et dans la solution du sol.
Graduellement disponibles pour les plantes.	Pendant la campagne agricole en cours ou lors des campagnes suivantes.	Les nutriments sous forme organique, comme les résidus de plantes et les fumiers organiques (notamment quand le rapport C/N est élevé), les engrais minéraux peu solubles (par exemple le phosphate naturel), et la fraction de MOS résistante à la minéralisation.
Pas disponibles pour les plantes.	Probablement pas pendant la vie de l'agriculteur.	Les nutriments contenus dans les roches, ou adsorbés au niveau des particules du sol.

Tableau 7.29 Concentration de micronutriments dans les sols et gamme de pH pour une disponibilité maximale.

Micronutriment	Symbole	Teneur totale (mg/kg)	Gamme optimale de pH
Bore	B	10–630	5,0–7,0
Cobalt	Co	1–40	5,0–5,5
Cuivre	Cu	1–960	5,0–6,5
Chlore	Cl	5–800	Pas affecté
Fer	Fe	3 000–100 000	4,0–6,0
Manganèse	Mn	30–5 000	5,0–6,5
Molybdène	Mo	0,1–18	6,0–8,5
Zinc	Zn	2–1 600	5,0–6,5

Tableau 7.30 Facteurs contribuant à la toxicité des micronutriments, symptômes de toxicité et niveaux de toxicité chez les plantes.

Micronutriment	Facteurs de toxicité	Symptômes de toxicité	Niveaux de toxicité (mg/kg)
B	Applications du compost urbain à grande échelle.	Chlorose et nécrose des pointes et contours de feuilles.	>200
Co	Sols (sableux, hautement calcaires, tourbeux). Oxydes de Fe/Al/Mn. Chaulage, drainage.	Pas connu (il n'est toujours pas clair si le Co a une fonction directe dans les plantes).	>1000 (certaines espèces >4000)
Cu	Contamination de sols en raison de grandes applications de lisier et de compost urbain.	Chlorose et nécrose des feuilles les plus âgées. Inhibition de l'élongation des racines.	>20
Cl	Sols côtiers mal drainés et secteurs affectés par le sel, tolérance des espèces au sel.	Brûlures foliaires et inhibition de croissance (surtout dans les cultivars sensibles au sel).	>3500
Fe	Sols submergés, zones inondées	Maladie des taches brunes du riz, et la décoloration violette des feuilles pour les autres cultures.	>500
Mn	Sols submergés, zones inondées.	Taches marron sur les nervures des feuilles, nécrose qui commence sur les pointes et contours des feuilles, des feuilles pliées.	>500
Mo	Le chaulage en plus de l'application du Mo.	Décoloration dorée ou jaun-orangée (quelquefois violette).	>1000
Zn	Sous un toit de maison en verre ou à claire-voie.	Se produit rarement.	>400

Tableau 7.31 Tolérance à la saturation en Al pour diverses cultures.

Culture	Nom latin	Faible	Modérée	Elevée
		0–40%	40–70%	>70%
Maïs	<i>Zea mays</i>	X		
Haricot mungo	<i>Vigna radiata</i>	X		
Arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	X	X	
Niébé	<i>Vigna unguiculata</i>		X	X
Soja	<i>Glycine max</i>	X		
Riz des hautes terres	<i>Oryza sativa</i>		X	X
Manioc	<i>Manihot esculenta</i>			X
Brachiaria	<i>Brachiaria spp.</i>			X
Setaria	<i>Setaria spp.</i>		X	
Crotolaria	<i>Crotolaria spp.</i>	X		
Mucuna	<i>Mucuna puriens</i>		X	X

7.8 Utilisation d'engrais

Tableau 7.32 Facteurs de conversion des nutriments.

De	Multiplier par	Pour obtenir/De	Multiplier par	Pour obtenir
NO ₃	0,226	N	4,426	NO ₃
NH ₃	0,823	N	1,216	NH ₃
NH ₄	0,777	N	1,288	NH ₄
CO (NH ₂) ₂ – urée	0,467	N	2,143	CO (NH ₂) ₂ – urée
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,212	N	4,716	(NH ₄) ₂ SO ₄
NH ₄ NO ₃	0,350	N	2,857	NH ₄ NO ₃
P ₂ O ₅	0,436	P	2,292	P ₂ O ₅
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,458	P ₂ O ₅	2,185	Ca ₃ (PO ₄) ₂
K ₂ O	0,830	K	1,205	K ₂ O
KCl	0,632	K ₂ O	1,583	KCl
KCl	0,524	K	1,907	KCl
K ₂ SO ₄	0,541	K ₂ O	1,850	K ₂ SO ₄
K ₂ SO ₄	0,449	K	2,229	K ₂ SO ₄
ZnSO ₄ ·H ₂ O	0,364	Zn	2,745	ZnSO ₄ ·H ₂ O
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,227	Zn	4,398	ZnSO ₄ ·7H ₂ O
SO ₂	0,500	S	1,998	SO ₂
SO ₄	0,334	S	2,996	SO ₄
MgSO ₄	0,266	S	3,754	MgSO ₄
MgSO ₄ ·H ₂ O	0,232	S	4,316	MgSO ₄ ·H ₂ O
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,130	S	7,688	MgSO ₄ ·7H ₂ O
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,243	S	4,121	(NH ₄) ₂ SO ₄
SiO ₂	0,468	Si	2,139	SiO ₂
CaSiO ₃	0,242	Si	4,135	CaSiO ₃
MgSiO ₃	0,280	Si	3,574	MgSiO ₃
MgO	0,603	Mg	1,658	MgO
MgO	2,987	MgSO ₄	0,355	MgO
MgO	3,434	MgSO ₄ ·H ₂ O	0,291	MgO
MgO	6,116	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,164	MgO
MgO	2,092	MgCO ₃	0,478	MgO
CaO	0,715	Ca	1,399	CaO
CaCO ₃	0,560	CaO	1,785	CaCO ₃
CaCl ₂	0,358	Ca	2,794	CaCl ₂
CaSO ₄	0,294	Ca	3,397	CaSO ₄
Ca ₃ (PO ₄) ₂	0,388	Ca	2,580	Ca ₃ (PO ₄) ₂
FeSO ₄	0,368	Fe	2,720	FeSO ₄
MnSO ₄	0,364	Mn	2,748	MnSO ₄
MnCl ₂	0,437	Mn	2,090	MnCl ₂

à suivre

Tableau 7.32 Suite

De	Multiplier par	Obtenir/De	Multiplier par	Obtenir
MnCO ₃	0,478	Mn	2,092	MnCO ₃
MnO ₂	0,632	Mn	1,582	MnO ₂
CuSO ₄ .H ₂ O	0,358	Cu	2,795	CuSO ₄ .H ₂ O
CuSO ₄ .5H ₂ O	0,255	Cu	3,939	CuSO ₄ .5H ₂ O
Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O	0,138	B	7,246	Na ₂ B ₄ O ₇ .5H ₂ O
Na ₂ B ₄ O ₇ .7H ₂ O	0,123	B	8,130	Na ₂ B ₄ O ₇ .7H ₂ O

Tableau 7.33 Teneur en éléments nutritifs (%) d'engrais couramment disponibles en Afrique subsaharienne.

Engrais	Abréviation	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	CaO	S	Autre
Urée	–	46						
Chlorure d'ammonium	AC	25						66 Cl
Nitrate d'ammonium	AN	34						
Nitrate de calcium	CN	15				26		
Nitrate d'ammonium et de calcium	CAN	27			2	4		
Sulfate d'ammonium	AS	21					24	
Phosphate de mono-ammonium	MAP	11	48–55		0,5	2	1–3	
Phosphate de diammonium	DAP	18–21	46–53				1–1,5	
Phosphate Naturel	PN		25–41			25–50		
Phosphate de magnésium fusionné	FMP		12–20		10–15	12–16		
Simple superphosphate	SSP		16–22			28	11–14	
Double superphosphate	SP36		32–36				5–6	
Triple superphosphate	TSP		44–53		0,5	12–19	1–1,5	
Chlorure de potassium	KCl			60–62				47 Cl
Sulfate de potassium	SOP			50–53				17–18
Nitrate de potassium	KN	13		44	0,5	0,5	0,2	
Kiesérite	Kies				27		22	
Langbéinite	SKMg			22	18		22	
Dolomie	GML				10–22	35–45		
Agrilime (calcite)	–					47		
Gypse	–					22–30	13–16	
NPK 15–15–15	–	15	15	15				
NPK 16-16-8	–	16	16	8			1	
NPK 13-13-21	–	13	13	21				
NPK 12- 12- 17+2 (Mg) + (oligoéléments)	–	12	12	17	2			Micro
NPK 15–15–6+4 (Mg)	–	15	15	6	4			
NPK 5-18-10		5	18	10			8	
NPK 5-17–15		5	17	15				
NPK 8-14-7		8	14	7				

Tableau 7.34 Guide pour le mélange d'engrais simples en Afrique subsaharienne.

	Sulfate de calcium	Dolomie	Calcaire	Phosphate Naturel	NPK (à base d'urée)	NPK (à base de nitrate d'ammonium)	Sulfate de potassium	Chlorure de potassium	Phosphate de diammonium	Triple superphosphate (TSP)	Simple superphosphate	Nitrate d'ammonium et de calcium	Sulfate d'ammonium	Nitrate d'ammonium
Urée					1		6		3	3	1			1
Nitrate d'ammonium					1	7	7		4	4			2	
Sulfate d'ammonium						7						2		
Nitrate d'ammonium et de calcium					1	7	7		5	5				
Simple superphosphate	4	4	4		4	4			4					
Tripler superphosphate (TSP)	4	4	4		4	4			4					
Phosphate de diammonium														
Chlorure de potassium						7								
Sulfate de potassium														
NPK (à base de nitrate d'ammonium)					1									
NPK (à base d'urée)														
Phosphate Naturel														
Calcaire														
Dolomie														

Clé

- Peut être mélangé et stocké.
- Peut être mélangé et stocké pour 2-4 jours seulement.
- Ne peut pas être mélangé – incompatible!

Notes explicatives

- 1 Le mélange absorbe de l'eau, devient humide difficile à stocker et à appliquer.
- 2 Le mélange peut devenir explosif!
- 3 Le TSP réagit avec l'urée et libère de l'eau résultant en un mélange humide qui forme une croûte au séchage.
- 4 Le TSP est produit en traitant le Phosphate Naturel avec de l'acide. L'acide libre peut réagir avec les autres composants du mélange.
- 5 Le mélange peut devenir humide et former une croûte au séchage.
- 6 Le mélange peut absorber de l'eau, sécher et devenir difficile à appliquer.
- 7 Le mélange pourrait se décomposer.

Tableau 7.35 Teneur en éléments nutritifs des engrais sources de nutriments secondaires.

Nutriment	Matériel	Concentration
Soufre	Sulfate d'ammonium	24% S
	Simple superphosphate	12% S
	Sulfate de potassium	18% S
	Sulfate de phosphate d'ammonium	15% S
	Gypse	13–18% S
	Pyrites	22–24% S
	Soufre minéral	84–100% S
	Sulfate de magnésium	13% S
	Tous les sels contenant du soufre	13–19% S
Calcium	Calcaire	80–95% CaCO ₃
	Dolomie	24–45% CaO
	Gypse	40% CaO
	SSP (simple superphosphate)	25–30% CaO
	Phosphate Naturel	39–48% CaO
	Calcaire	54% CaO
	Nitrate d'ammonium et de calcium	10–20% CaO
Magnésium	Magnétite	40% MgO
	Sulfate de magnésium	16% MgO
	Mg chélaté	2–10% MgO
	Dolomie	5–20% MgO
Bore	Acide borique	17,5% B
	Solubor	20,5% B
	Simple superphosphate(SSP) traité au bore	0,18% B
Cuivre	Sulfate de cuivre	24% Cu
	Cu chélaté	5–12% Cu
Fer	Sulfate de fer	19% Fe
	Composés chélatés	5–10% Fe
	Fer chélaté (FCO)	12% Fe
Manganèse	Sulfate de manganèse	30,5% Mn
	Composés chélatés	5–12% Mn
Molybdène	Molybdène d'ammonium	54% Mo
Zinc	Sulfate de Zn	21% Zn
	Monohydrate de sulfate de zinc	33% Zn
	Zn chélaté (FCO)	12% Zn
	Autres composés	4–13% Zn
Chlorite	Chlorure de potassium	48% Cl
Tous	Engrais composé NPK	Variable

Tableau 7.36 Calendrier d'application d'engrais par rapport aux propriétés du sol, conditions climatiques et besoins des cultures.

Sol	Climat	Cultures annuelles	Cultures pérennes
N Nitrate (NO ₃ ⁻) lessivé dans des sols à faible pH, à texture légère, bien drainés. Volatilisation de l'ammoniaque (NH ₃) plus élevée avec un pH croissant.	Augmentation du lessivage pendant les périodes de fortes précipitations. Augmentation de la nitrification pendant les périodes de hautes températures.	Apport supplémentaire nécessaire en phase initiale, durant la floraison et pendant la phase finale.	Application selon le cycle du temps et de la récolte.
P Forte sorption (fixation) dans des sols acides à texture fine contenant de l'oxyde de Fe/Mn/Al. Pas disponible à pH élevé en raison des précipitations avec Ca.	Pertes supplémentaires de P appliqué à la surface par ruissellement et érosion durant les périodes et incidences de fortes précipitations.	Avant ou au moment du semis, incorporé au sol près de la surface.	Pendant la préparation du sol, incorporé au sol près de la surface et/ou près du trou de semis.
K Des sols à texture légère, bien drainés et pauvres en MOS seraient enclins au lessivage. Des minéraux illitiques dans certains sols tropicaux peuvent causer la fixation du K. Des cultures bien approvisionnées peuvent mieux résister à des périodes sèches.	Potentiel élevé de lessivage, ruissellement et érosion pendant les périodes de fortes précipitations.	Avant ou au moment du semis, incorporé au sol près de la surface. Des taux élevés d'application (c'est-à-dire >120 kg K ₂ O/ha) devraient être divisés (c'est-à-dire 50% en fumure de fond plus 1-2 fumures de couverture).	Application régulière suivant les conditions météorologiques et cycles de cultures.

Tableau 7.37 Fertilisation recommandée pour une sélection de cultures en fonction des besoins de ces cultures.*

Culture	Quantité d'éléments nutritifs nécessaires à la production de 1t de récoltes comestibles (kg)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Banane	7,1	2,1	20,1
Haricots	69,6	20,0	55,1
Chou	4,2	1,1	3,7
Manioc	10,4	2,4	6,8
Agrume	1,5	0,4	2,5
Café	76,9	12,4	86,6
Coton	105,3	43,9	112,0
Arachide	57,3	12,1	26,3
Maïs	28,1	11,2	49,5
Palmier à huile	11,8	3,8	13,3
Pomme de terre	5,9	2,5	10,7
Sorgho	42,2	19,5	70,2
Canne à sucre	1,3	0,4	2,9
Tournesol	37,4	24,9	110,0
Soja	79,0	14,0	36,0
Thé	40,0	26,4	28,9
Riz	23,3	9,1	37,3
Blé	28,3	10,5	32,7

*Ces valeurs ne tiennent pas compte de pertes en nutriments du sol.

Tableau 7.38 Caractéristiques des sources majeures de Phosphate Naturel disponibles en Afrique subsaharienne.

Pays	Lieu	P ₂ O ₅ Total	% P ₂ O ₅ soluble dans 2% SAC	% P ₂ O ₅ soluble dans 2% SAF	CaO (%)
Australie	Christmas Island	34	12	12	36
Chine	Yunnan	35	14	8	44
Indonésie	Gresik	28	4	s.o.	43
Jordanie	El Hassa	33	11	15	50
Maroc	Khourigba	33	11	17	51
Tunisie	Gafsa	30	9	22	47
USA	Floride	31	5	7	46
USA	Caroline du Nord	35	13	25	49

*SAC = solution d'acide citrique, SAF = solution d'acide formique

Tableau 7.39 Propriétés requises du Phosphate Naturel pour application directe.

Propriété	Norme minimale (%)	Commentaire
Teneur		La solubilité indique la quantité de P libéré pour absorption par la plante. La teneur en CaO affecte les propriétés du chaulage.
• P ₂ O ₅	>25	
• Total CaO	>40	
Solubilité		Le P ₂ O ₅ total doit être évalué par rapport à la solubilité.
• acide citrique à 2%	>8,2	
• acide formique à 2%	>14	
Finesse		Plus la matière est fine, plus la superficie de réaction avec la solution du sol est grande.
• Passant au tamis à mailles de 80	>80	
• Passant au tamis à mailles de 50	>50	
Teneur en humidité	<2	La matière humide est difficile à étaler.
Teneur en métaux lourds		De petites quantités de métaux lourds (par exemple, Cd, Pb, Ni) dans les phosphates naturels et leur accumulation potentielle dans les sols en raison de l'application d'engrais P est un sujet de préoccupation pour l'environnement. En Asie du Sud-Est, à ce jour, des teneurs comparables en métaux lourds ont été trouvées dans des sols fertilisés et non fertilisés. De l'uranium dans des dépôts sédimentaires formés sous l'eau fraîche peut s'avérer problématique pour les travailleurs de mines.

7.9 Agronomie des cultures

Tableau 7.40 Densités de plantation recommandées pour les cultures principales cultivées dans des conditions de pluviométrie favorables et marginales.*

	Pluviométrie élevée				Pluviométrie faible			
	Entre les lignes (cm)	Sur les lignes (cm)	Plantes par poquet	Densité (milliers de plantes par ha)	Entre les lignes (cm)	Sur les lignes (cm)	Plantes par poquet	Densité (milliers de plantes par ha)
Maïs	75	25	1	53	90	30	1	37
Soja	45	5	1	444	45	15	1	148
Haricots	50	10	1	200	50	15	1	133
Riz	20	20	2	500	30	30	2	222
Sorgho	75	15	1	888	90	15	1	74

*A titre de lignes directrices.

7.10 Economie des exploitations agricoles

Tableau 7.41 Exemple d'une analyse partielle de budget visant à comparer la dose d'engrais recommandée avec les pratiques de l'agriculteur pour l'arachide.

Revenu additionnel par hectare grâce à la pratique recommandée		\$
Pratique recommandée	1,25 t d'arachides à 60 \$/t	75
Pratique de l'agriculteur	0,5 t d'arachides à 60 \$/t	30
Revenu supplémentaire net A		45
Intrants	Engrais supplémentaire requis	
	25 kg d'urée à 0,2 \$/kg	5
	50 kg de TSP à 0,3 \$/kg	15
	25 kg de KCl à 0,4 \$/kg	10
Main d'œuvre	1 jour-homme de travail pour l'épandage à 5\$/homme-jour	5
Total des coûts supplémentaires B		35
Marge bénéficiaire sur coûts supplémentaires résultants de la mise en œuvre des pratiques recommandées (A - B)		10

7.11 Généralités

Tableau 7.42 Matériel nécessaire pour les activités relatives aux sols au champ.

Matériel	Positionnement	Echantillonnage	
		Profil du sol	Partie supérieure du sol
Mètre-ruban	X		
Clinomètre	X		
Kit GPS	X		
Carte et photo aérienne	X		
Pelle/bêche		X	
Houe		X	
Coutelas		X	
Tarière Edelman			X
Ecritoire, crayon et gomme		X	X
Graphique des couleurs du sol de Munsell		X	
Couteau		X	X
Loupe simple		X	
Flacon de lavage (H ₂ O)		X	X
Kit de pH		X	X
HCl		X	X
Godet, sacs de prélèvement et stylos		X	X
Pots à échantillons		X	
Sac de terrain		X	X
Manuels		X	X

7.12 Liste d'ouvrages à lire

Cette liste sert de guide bibliographique de la littérature récente. Chaque citation est suivie de commentaires et d'une explication *en italique*. Là où la source est téléchargeable, un lien est fourni.

Anderson, J.M. et Ingram, J. S. I. (1993) *Tropical Soil Biology and Fertility. A Handbook of Methods*, 2nd eds. CAB International, Wallingford, UK.

Un manuel offrant des méthodes pour la recherche sur la fertilité du sol.

Dierolf, T.S., Fairhurst, T.H. and Mutert, E.W. (2001) *Soil Fertility Kit: a Toolkit for Acid, Upland Soil Fertility Management in Southeast Asia*. Potash & Phosphate Institute (PPI), ProRLK, GTZ GmbH, Singapore.

Source des tableaux 7.2 à 7.4, 7.6 à 7.33, 7.36, 7.38, 7.39, 7.41 et 7.42.

EFMA (2006) *Guidance for the Compatibility of Fertilizer Blending Materials*. L'Association européenne de Fabricants d'Engrais, Bruxelles.

Informations sur le mélange d'engrais.



Photo 7.1 Un pH-mètre® est un outil à bas prix utile pour mesurer le pH du sol au champ.



Photo 7.3 Une tarière Edelman est un outil essentiel pour l'échantillonnage des sols.



Photo 7.2 Les palettes de couleur pour les feuilles peuvent être utilisées pour améliorer le calendrier d'application d'engrais azoté de couverture pour le riz.

Glossaire

Acidité du sol: Une concentration en ions (H^+) dans le sol. Les sols acides ont un pH inférieur à 7.

Agriculture à faibles intrants: Utilisation de petites quantités d'intrants pour diminuer les coûts de production et réduire les effets négatifs possibles que les intrants externes (par exemple, les engrais) pourraient avoir sur l'environnement.

Agriculture de conservation: Système de gestion des cultures et des terres visant la réduction du travail du sol, le maintien des résidus de culture, l'utilisation de la rotation des cultures et la diversification des cultures (source: <http://www.fao.org/ag/ca/fr>).

Agriculture itinérante: Les champs sont cultivés pendant une courte période de 1–3 ans, puis mis en jachère pour reconstituer la fertilité des sols.

Agroécologie: La science de l'application des concepts et principes écologiques à la conception et à la gestion des agroécosystèmes durables (source: <http://www.agroecology.org/glossary.html>).

Agroforesterie: Un mode d'exploitation des terres agricoles associant plantations d'arbres et cultures sur une même parcelle d'une manière complémentaire. Une définition plus simple est la plantation d'arbres dans les exploitations agricoles (source: <http://fr.wikipedia.org/wiki/agroforesterie>).

Agronomie: La théorie et la pratique de la production agricole et de la gestion des sols.

Analyse de sensibilité: L'étude de la répartition de l'incertitude dans le résultat d'un processus entre les différentes sources d'intrants. Elle permet d'améliorer la compréhension ou la quantification d'un système d'exploitation agricole (c'est à dire la relation entre les variables d'intrant et d'extrait).

Analyse ex ante: Une évaluation de l'impact attendu de l'intervention avant sa mise en œuvre (source : <http://en.wikipedia.org/wiki/Ex-ante>).

Analyse ex post: Une évaluation de l'impact observé d'une intervention après sa mise en œuvre. Les évaluations d'impact appropriées déterminent les conditions où une intervention a réussi et où elle n'a pas bien marché.

Application localisée: Lorsque l'engrais est appliqué à chaque poquet plutôt que d'être épandu sur la surface du

Aridoculture: Pratique de cultures dans les zones de faibles précipitations sans irrigation.

Budget partiel: Dans le cadre de la gestion de la fertilité des sols dans un système d'exploitation, un budget partiel est utilisé pour évaluer les retombées économiques d'un projet de modification des pratiques de gestion agricole en tenant compte des changements au niveau des intrants et extrants particuliers qui sont affectés par les changements dans les pratiques de gestion agricole.

Capacité tampon: La mesure dans laquelle un sol résiste aux variations de pH. Les sols contenant de grandes quantités d'argile et de matière organique ont une capacité tampon élevée, ce qui signifie qu'ils auront besoin de grandes quantités de chaux pour augmenter le pH du sol. Les sols ayant une faible capacité tampon, comme les sols sableux avec peu de matière organique exigent moins de chaux pour augmenter le pH du sol (source: http://fr.wikipedia.org/wiki/Solution_tampon).

Capital sol: Le sol, y compris ses réserves en éléments nutritifs, considéré comme un actif.

Carence en éléments nutritifs: La demande en nutriments est supérieure à l'offre du sol, ce qui provoque la réduction ou la perturbation de la croissance des plantes.

Cartes des flux de ressources: Représentation visuelle du mouvement des éléments nutritifs, de la main-d'œuvre, des produits végétaux, des résidus de récolte et du fumier d'animaux à l'intérieur et entre les champs.

Champignons mycorhiziens arbusculaires: Type de mycorhize pénétrant dans les cellules corticales des racines d'une plante vasculaire. Les mycorhizes améliorent l'absorption des nutriments, en particulier le phosphore par la plante hôte (source: <http://fr.wikipedia.org/wiki/mycorrhize>).

Champignons mycorhiziens: Champignons qui forment une association symbiotique avec les racines d'une plante vasculaire et améliorent l'absorption des nutriments par la plante.

Champs éloignés: Les champs qui sont plus éloignés de la maison familiale, qui reçoivent moins d'intrants et d'investissement en main-d'œuvre que les champs proches du domicile.

Champs près de la maison: Les champs situés à proximité de la maison familiale qui sont généralement bien gérés et reçoivent de grands apports d'engrais et de main-d'œuvre. Voir **Champs éloignés**.

Chaulage: Application d'un matériau alcalin (par exemple, de la chaux agricole) tel que le calcaire dolomitique pour augmenter le pH du sol au niveau requis pour la croissance des plantes.

Compromis: Situation qui implique la perte d'une qualité ou d'un aspect de quelque chose en échange d'une autre qualité ou d'un autre aspect (source: <http://en.wikipedia.org/wiki/trade-off>).

Culture intercalaire: Plantation de deux ou plusieurs cultures sur la même parcelle. Les cultures peuvent être plantées à des périodes différentes, mais les périodes de croissance doivent se chevaucher.

Désadoption : Lorsque les agriculteurs qui ont participé à un projet reviennent à leurs anciennes pratiques après que le projet qui assurait la promotion de nouvelles pratiques ait pris fin.

Développement durable: Développement où l'utilisation des ressources répond aux besoins humains sans compromettre la capacité de satisfaire les besoins de l'homme à l'avenir.

Dotation en ressources: Ressources pour la production agricole qui sont mises à la disposition de l'agriculteur.

Écart de productivité: Différence entre la productivité agricole réelle et la productivité réalisable en utilisant les meilleures pratiques de gestion.

Écart de rendement: Différence entre le rendement réel et le rendement réalisable d'un agriculteur. Le rendement réalisable est la production maximale observée dans une zone agro-écologique donnée lorsque les meilleures pratiques de gestion sont utilisées.

Ecologie: Etude des relations que des organismes vivants ont entre eux et avec leur environnement naturel (source : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ecologie>).

Efficacité agronomique: Quantité supplémentaire de rendement obtenu par kg de nutriment ajouté. La différence entre le rendement dans une parcelle témoin et dans une parcelle ayant bénéficié d'apport de nutriments, divisée par la quantité de nutriment ajouté. L'efficacité agronomique est calculée séparément pour chaque élément nutritif.

Engrais composés: Engrais contenant plus d'un nutriment (par exemple, le phosphate diammonique, engrais composé 15-15-15).

Épuisement des nutriments: L'exportation des nutriments par les produits végétaux et la biomasse est supérieure à la reconstitution par l'apport de résidus de culture, de fumier de ferme et d'engrais.

Essais soustractifs: Expérimentations pour identifier quels éléments nutritifs limitent la croissance des plantes. Les traitements comprennent généralement +N+P+K+Mg, -N+P+K+Mg, +N-P+K+Mg, +N+P-K+Mg, +N+P+K-Mg, et -N-P-K-Mg.

Eutrophisation: Croissance excessive d'algues ou de plantes aquatiques en raison de la présence de grandes concentrations de phosphates et de nitrates. La décomposition ultérieure des algues conduit souvent à la raréfaction de l'oxygène, causant la mort d'autres organismes (source: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Eutrophisation>).

Facteurs limitant la croissance: Des facteurs tels que l'eau et les nutriments, d'une part ou les aliments pour bétail et le temps de recherche de nourriture, d'autre part qui limitent la croissance des cultures et du bétail, respectivement.

Facteur principal: Le facteur le plus influent dans la détermination du résultat d'un processus donné.

Frelater: Appauvrir la qualité en ajoutant une autre substance, particulièrement en ce qui concerne les engrais.

Fumier de ferme: Mélange d'excréments et d'urine des animaux de la ferme, de la litière et des restes de fourrages grossiers ou de fourrage pour bétail, ayant subi une décomposition partielle (source: http://agritech.tnau.ac.in/org_farm/orgfam_manure.html).

Géoréférence: Grille de coordonnées qui définissent la position spatiale d'un objet, ou le processus de définition de ces coordonnées.

Gradients de fertilité du sol: Différences dans la fertilité du sol causées par les différences dans la gestion des cultures (par exemple, l'application d'engrais organiques et minéraux) dans une ferme à long terme (source: http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i25173_001.pdf).

Hétérogénéité: Manque d'uniformité. Terme utilisé pour décrire la variabilité de l'état de la fertilité du sol à l'intérieur et entre les exploitations en raison de différences dans la gestion.

Hyphes: Longues branches des structures fongiques qui sont le principal mode de croissance végétative des champignons.

Inoculum de rhizobiums: Produits commerciaux utilisés pour introduire des rhizobiums afin d'assurer la nodulation et la fixation de l'azote dans les plantes légumineuses. Les inocula doivent être compatibles avec les espèces de légumineuses hôtes et sont appliqués aux semences de légumineuses avant le semis ou dans le sillon au moment du semis. Les inocula ne sont nécessaires que lorsque des rhizobiums efficaces et compatibles ne sont pas présents dans le sol en nombre suffisant.

Inoculation: Processus d'application des inocula de rhizobium produits commercialement aux semences de légumineuses ou sur le sol où les semences de légumineuses seront semées pour introduire des bactéries symbiotiques compatibles et efficaces, et améliorer la nodulation et la fixation biologique de l'azote.

Intensification: Pratiques qui entraînent une augmentation de la productivité par unité de surface, impliquant des changements dans l'utilisation des ressources (par exemple, main-d'œuvre, apports extérieurs).

Introduction: Initiation à un sujet dans le cadre d'une formation.

Judicieux: Selon un jugement précis ou un bon discernement.

Labour de conservation: Une forme de travail du sol qui laisse au moins 30% des résidus de cultures précédentes sur la surface du sol (Source: <http://www.mda.state.mn.us/protecting/conservation/practices/constillage.aspx>).

Légumineuse à graines: Légumineuse cultivée principalement pour ses graines.

Lessivage: Mouvement des nutriments de cultures au-delà de la zone des racines principalement dû à un drainage excessif dans des sols à texture grossière.

Macronutriments: Éléments nutritifs exigés par les plantes en grandes quantités (c'est-à-dire nutriments qui constituent au moins 0,1% de la matière sèche des plantes).

Mauvaises herbes envahissantes: Mauvaises herbes qui sont particulièrement en concurrence avec les plantes ou qui les détruisent.

Modèle: Représentation simple d'un système.

Moyens de subsistance: Moyens d'assurer les nécessités de la vie, contrôle d'un individu sur les revenus et les ressources qui peuvent être utilisés ou échangés pour satisfaire les besoins de base (source: <http://en.wikipedia.org/wiki/Livelihood>).

Niches socio-écologiques: Conditions agro-écologiques et socio-économiques pour lesquelles une intervention particulière est adaptée.

Oligoéléments: Éléments nutritifs exigés par les plantes en petites quantités (c'est-à-dire nutriments qui constituent moins de 0,1% de la matière sèche de la plante), qui sont souvent suffisants dans la plupart des sols (source: <http://fr.wikipedia.org/wiki/oligo-élément>).

Optimiser: Utiliser une ressource de la façon la plus efficace ou la meilleure.

Orientation vers le marché: Lorsque les produits agricoles ou d'élevage sont principalement vendus sur le marché plutôt que pour la consommation familiale.

Période de jachère: Période pendant laquelle un champ se repose afin de restaurer la fertilité des sols.

Porosité du sol: Quantité d'espace rempli d'air et d'eau entre les particules du sol (source: <http://www.noble.org/ag/sols/soilwaterrelationships/>).

Prix à la production: Prix que l'agriculteur recevrait si son produit était vendu directement à partir de l'exploitation.

Recommandations générales pour l'application d'engrais: Recommandations pour l'application d'engrais fixes qui ne considèrent pas la variabilité des sols, des climats et des séquences des cultures.

Réducteurs de croissance: Facteurs tels que les ravageurs, les mauvaises herbes, les maladies et les polluants qui réduisent la croissance des cultures et du bétail.

Résidus de récolte: Partie de la biomasse des cultures qui reste quand la partie économique de la récolte, telle que les grains ou les tubercules, a été enlevée.

Révolution verte: Série d'initiatives de recherche, de développement et de transfert technologique intervenues entre les années 1940 et la fin des années 1970, visant à accroître la production agricole (source: http://fr.wikipedia.org/wiki/Révolution_verte).

Rhizobiums: Bactéries présentes dans le sol qui forment des nodules racinaires avec des plantes légumineuses compatibles et qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique (N) dans les nodules.

Risque: Probabilité de mauvaises récoltes dues aux effets de la sécheresse, des ravageurs et des maladies, et probabilité de déficiences du marché.

Roche-mère: Matériau à partir duquel sont formés les sols (habituellement roche ou saprolite).

Rotation de cultures: Succession temporelle des différentes cultures cultivées dans le même champ.

Santé des sols: Fertilité physique, chimique et biologique des sols.

Semelle de labour: Couche dense de sol sous la surface qui est imperméable à l'eau. Principalement formée par compactage suite au labour répété avec charrue à soc et /ou la circulation des véhicules lourds.

Sollicitations concurrentes: Lorsque différentes parties prenantes aux intérêts divergents cherchent à utiliser la même ressource limitée en même temps.

Sols dégradés: Sols déficients en nutriments et appauvris en matière organique, avec une faible activité biologique et une mauvaise structure.

Sols sensibles aux intrants: Sols qui présentent une forte réponse à l'application d'éléments nutritifs.

Solutions ou technologies les mieux adaptées: Solutions ou technologies les plus susceptibles de donner les meilleurs résultats dans un contexte particulier.

Solutions ou technologies prometteuses: Solutions ou technologies considérées comme les plus susceptibles de donner les meilleurs résultats dans une série de contextes différents.

Subvention: Paiement en espèces, réduction d'impôt, ou incitation, accordés par le gouvernement pour protéger les intérêts des agriculteurs, supprimer un fardeau financier, ou encourager l'achat d'intrants agricoles ou la vente d'un produit agricole.

Symbiose: Interaction entre deux organismes différents vivant en association étroite physique, qui est à leur avantage.

Système de fonctionnement d'une exploitation agricole: Un ménage, ses ressources et les flux de ressources et interactions au sein d'une exploitation agricole donnée.

Système d'exploitation agricole: Un groupe d'exploitations agricoles individuelles. Le système d'exploitation agricole comprend les sous-systèmes de l'exploitation, c'est à dire les systèmes de culture et d'élevage, et la terre commune qui est utilisée pour le pâturage, la collecte de bois de chauffage et de fruits, etc.

Texture du sol: Quantité de sable, de limon et d'argile dans la fraction minérale du sol.

Toxicité des nutriments: La fourniture des nutriments du sol dépasse la demande de la plante de telle sorte que la croissance est perturbée plutôt que renforcée.

Versatilité: Dans le cadre de la fixation biologique de l'azote, possibilité pour une légumineuse de former une symbiose efficace avec de nombreuses souches de rhizobiums, ou pour une souche de Rhizobium de former des nodules avec beaucoup de plantes hôtes.

Sigles et abréviations

AC	Agriculture de conservation
AGRA	Alliance pour une Révolution Verte en Afrique
Al	Aluminium
ASHC	Consortium Africain pour la Santé du Sol
ASS	Afrique sub-saharienne
B	Bore
C	Carbone
Ca	Calcium
Ca(OH) ₂	Hydroxyde de calcium
CABI	CAB International
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomie
CaO	Oxyde de calcium
CaSO ₄ .2H ₂ O ⁻	Gypse
CEC	Capacité d'échange cationique
CIAT	Centre International d'Agriculture Tropicale
CKW	Travailleur communautaire du savoir
Cl	Chlore
Co	Cobalt
Cu	Cuivre
CMA	Champions mycorhiziens arbusculaires
DAP	Phosphate diammonique
EA	Efficacité agronomique
ECC	Equivalent en carbonate de calcium
Fe	Fer
FSA	Analyse des systèmes d'exploitation agricole
GIFS	Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols
Sols GPS	Système de positionnement mondial
H ⁺	Ion hydrogène
ICRAF	Centre International pour la Recherche en Agroforesterie
ICRW	Centre International de Recherche sur les Femmes
IFDC	Centre International pour le Développement des Engrais
IITA	Institut International d'Agriculture Tropicale
IPNI	Institut International de la Nutrition des Plantes
IR	Indice de récolte
IRRI	Institut International de Recherche sur le Riz
K	Potassium
K ₂ SO ₄	Sulfate de potassium
KCl	Chlorure de potassium
LEISA	Agriculture durable à faible utilisation d'intrants externes
LER	Proportion équivalente de terre
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
MOS	Matière organique du sol
MSU	Université d'Etat du Michigan

N	Azote
Na	Sodium
NH ₃	Ammoniac
NH ₄ ⁺	Ammonium
Ni	Nickel
NO ₃ ⁻	Nitrate
NPK	Azote, phosphore, potassium
O	Oxygène
OGM	Organisme génétiquement modifié
PN	Phosphate Naturel
RDC	République Démocratique du Congo
RP	Roche phosphatée
S	Soufre
Si	Silicium
SMS	Short message service (texto)
SOFECSA	Consortium d'Afrique Australe pour la Fertilité des Sols
SSP	Simple superphosphate
TCC	Tropical Crop Consultants Ltd
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TR	Taux de recouvrement
TSP	Triple superphosphate
USAID	Agence Américaine pour le Développement International
RVC	Ratio Valeur/Coût
WUR	Université de Wageningen
Zn	Zinc

Index

- Afrique sub-saharienne
 - besoins en alimentation 6
 - développement des systèmes d'exploitation agricole 7–8
 - fertilité du sol 11
 - intensification du rendement 6
 - LEISA 15–16
 - paradigmes de la gestion de la fertilité des sols tropicaux 13
 - paysages agricoles 11
 - utilisation d'engrais et de matière organique 17
 - utilisation des engrais minéraux
 - azote 16
 - coût 14
 - Déclaration d'Abuja 14–15
 - situation de l'agriculteur 14
- Agriculture durable à faible utilisation d'intrants externes (LEISA)
 - fumier et compost 15–16
 - nutriments 15–16
 - systèmes d'élevage 16
- Agronomie des cultures 153
- Analyse des systèmes de culture
 - budgétisation participative 83–85
 - calendrier culturel 82
 - estimation, écarts de rendement 82
 - fréquence et calendrier des visites 82
 - inspection des champs 81
 - tenue des registres agricoles 82
- Analyse des systèmes d'exploitation agricole
 - collecte de données 76
 - collecte, données biophysiques 79
 - composantes 75
 - conception 76–78
 - consommation quotidienne et annuelle de matière sèche et production de fumier 138
 - étapes 135
 - évaluation des risques 81
 - historique, activités passées 78
 - identification, systèmes d'exploitation agricole dominants dans chaque terroir 79
 - liste de contrôle 135–136
 - outil 75
 - pratiques de gestion de fertilité du sol 136–137
 - problèmes et recommandations 137–138
 - produit 75
 - questions à poser 136
 - ratio terre/main-d'œuvre 80
 - recherches sur l'utilisation d'engrais 137
 - typologie des agriculteurs 79–80
- Analyse *ex ante*, GIFS
 - analyses de budget partiel 100, 154
 - collecte de données 99–100
 - description 95
 - données requises 99
 - EA 97
 - étapes suivantes 100
 - incitations économiques 97–98
 - objectif 95
 - performance du marché 98–99
- Analyse *ex post*, GIFS 102
- ASS *voir* Afrique sub-saharienne
- Assurance-récolte 93
- Carence en azote
 - banane 68
 - maïs 69
- Champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)
 - caractéristiques des plantes 56
 - inocula commerciaux 55
 - produits 56
 - spores 72
- CMA *voir* Champignons mycorhiziens arbusculaires (CMA)
- Collecte d'eau 57
- Densité apparente du sol 133
- Développement des systèmes d'exploitation agricole, Afrique sub-saharienne 7
- EA *voir* Efficacité agronomique (EA)
- Echantillonnage de sol 132–133
- Economie des exploitations agricoles
 - analyse de budget partiel 154
 - matériel requis, activités relatives aux sols 154
- Efficacité agronomique (EA)
 - taux d'application de l'engrais 24
 - utilisation d'engrais azotés 97
 - utilisation de nutriments et rendement en grain 23–24
- Engrais azoté
 - productivité du maïs 66
 - sables de granite, Chinyika, Zimbabwe 66
- Engrais minéraux
 - amendements du sol
 - chaux 40
 - gypse 40
 - description 36
 - engrais azoté 36

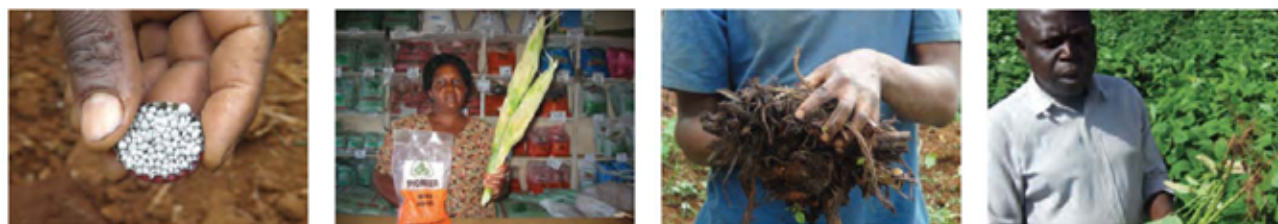
- Engrais minéraux (*continued*)
 - engrais composés 38
 - engrais de mélange 38, 39
 - engrais de mélange NPK 39
 - engrais multinutriments complexes 38
 - engrais phosphatés (P) 36–38
 - engrais potassiques (K) 38
 - teneur en nutriments et coût 38–39
- Engrais phosphatés 36–38
- Environnement politique
 - connaissance sur la GIFS 89
 - informations sur le marché et contrôle de la qualité 89
 - infrastructures 89
 - politiques foncières 90
 - subventions agricoles 88
- Erosion hydrique et éolienne 48–49
- Évaluation de la fertilité des sols
 - analyse du sol et interprétation des données 87
 - caractéristiques, sol fertile 83
 - échantillonnage des sols 86–87
 - flux de ressources entre les exploitations agricoles et à l'intérieur de celles-ci 83–86
 - plantes révélatrices 86
 - symptômes de déficience 86
- Expérimentation des technologies dans les exploitations agricoles, GIFS 102

- Fertilité du sol
 - définition 128
 - mesure 128–129
- Fonctions du sol
 - espace/plate-forme physique 119
 - milieu pour la croissance des plantes 119
 - organismes biologiques 119
 - protection de l'environnement 119
 - source de matières premières 119
- FSA *voir* Analyse des systèmes d'exploitation agricole (FSA)

- Germoplasme
 - description 50
 - efficacité d'utilisation des nutriments 51
 - légumineuses 52–55
 - plants 51
 - potentiel de rendement génétique 50–51
 - résistance aux ravageurs et maladies 51
- Gestion de la fertilité des sols
 - agriculture biologique 59
 - agriculture de conservation (AC) 58
 - carence en azote 68–69
 - carence en phosphore 69
 - carences en micronutriments 57
 - CMA 55–56
 - collecte d'eau 57
 - contrôle de l'érosion 57
 - correction de l'acidité du sol 56
 - cultures intercalaires 58
 - cultures intercalaires de soja 65
 - date de plantations et méthodes 57
 - description 32
 - développement des pousses et des racines 68
 - diguettes pour la conservation du sol 67
 - économie
 - capital sol 60
 - composantes du coût 60
 - contraintes 61
 - production continue de maïs 60–61
 - effets du pH 128
 - efficacité de l'utilisation d'engrais
 - conditions de la fertilité 42
 - EA 41–42
 - efficacité d'utilisation interne 42
 - fraction de récupération 41
 - interprétation 43
 - engrais azoté 66
 - engrais de fond 71
 - engrais minéraux *voir* Engrais minéraux
 - espacement 57, 153
 - essais soustractifs 69
 - genre de légumineuses et rhizobium compatible 141
 - germoplasme 50–51
 - germoplasme amélioré de manioc 64
 - interventions 59
 - intrants organiques
 - agriculture 34
 - avantages et inconvénients 35
 - couleur, teneur en fibres et goût 33–34
 - description 32
 - matières 32
 - matière organique du sol (MOS) 34
 - labour selon les courbes de niveau 67
 - légumineuses à grain 64
 - les « 4 R » ou « 4 bons » 43–47
 - maïs intercalé
 - manioc 66
 - pois d'Angole 66
 - mythes et faits 141
 - nodules 73
 - N, P et S dans les sols des hautes terres 140
 - nutriments 48–50
 - plantation de maïs 67
 - plantation et conservation de l'eau 67
 - pratiques de gestion et matière organique du sol (MOS) 140
 - préparation de la terre 57
 - principes et méthodes de réduction de l'érosion du sol 142
 - résidus de récolte et herbe 70
 - rotation des cultures et conservation de l'eau 67
 - rapture des croûtes 57

- sarclage 57
- sources d'éléments nutritifs, réhabilitation des sols 140–141
- surmonter les inhibiteurs de la fixation de N₂ 141
- symptômes de carence en potassium 69
- symptômes de carences en nutriments 70
- systèmes de manioc 64
- teneur en nutriments, fumier, résidus de cultures 142
- unités et méthodes utilisées 138
- utilisation d'engrais et environnement 47–48
- valeurs essentielles, propriétés physiques et chimiques 139
- Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS)
 - adaptation locale
 - engrais azoté et fumier 23
 - réponse de l'engrais, sols pauvres 22–23
 - ajustement de l'adoption 102–103
 - analyse *ex ante* 95–102
 - analyse *ex post* 102
 - ateliers 114
 - campagnes 113
 - composantes 27
 - définition 2, 17
 - démonstration de la gestion des éléments nutritifs 112
 - description 13
 - EA 23–25
 - effet de la gestion agronomique, engrais 22
 - effet de l'engrais, rendement maïs 21
 - engrais et intrants organiques 19
 - engrais et résidus de cultures, rendement millet 21
 - engrais minéraux 20
 - expérimentation dans les exploitations agricoles 102
 - germoplasme 20–21
 - gestionnaire d'éléments nutritifs pour le système du riz 115
 - intrants organiques 20
 - LER (proportion équivalente de terre) 25
 - magasin d'engrais 112
 - matériel de vulgarisation
 - choix des supports médiatiques 105
 - communiquer directement avec les agriculteurs 104
 - prestataires de services de vulgarisation 104
 - mise en œuvre 18–19, 117
 - préparation, matériels de vulgarisation 3
 - principes économiques rationnels 25–26
 - stage pratique pour agriculteurs 114
 - stratégie de communication 103
 - système des Travailleurs Communistes du Savoir 115
 - TIC 105–109
 - utilisation de matériel audio-visuel 116
 - utilisation du téléphone mobile pour accéder aux informations sur des cultures 112
 - variétés de soja, phosphore 22
- Gestionnaire d'éléments nutritifs pour le système du riz 115
- GIFS *voir* Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols (GIFS)
- Légumineuses
 - bois de chauffage et piquets 52
 - composantes 53
 - engrais verts et légumineuses arborescentes 52
 - fertilité 52
 - fertilité du sol 54–55
 - fouillage 52
 - nourriture 52
 - rhizobiums indigènes 53–54
- LEISA *voir* Agriculture durable à faible utilisation d'intrants externes (LEISA)
- LER *voir* Proportion équivalente de terre (LER)
- Marché des intrants
 - dimensions des sacs 91
 - frais de transport de l'engrais 90
 - terroirs 90
- Marchés
 - crédit 92–93
 - développement 94–95
 - intrants 90–91
 - main-d'œuvre 93
 - produits 93–94
- Marchés de produits 93–94
- Marchés du crédit
 - assurance-récolte 93
 - commerçants locaux ou détaillants d'intrants 92
 - filière intégrée – contrats pour les intrants/produits 92
 - programmes de crédit gouvernementaux 92
 - programmes de microfinance 92
 - sources 92
- Marchés du travail 93
- Matière organique du sol (MOS) 34
- MOS *voir* Matière organique du sol (MOS)
- Nutriments
 - carences 144–146
 - dans la production végétale 121–124
 - disponibilité 146
 - érosion hydrique et éolienne 48–49
 - gestion des résidus de récoltes 50
 - identification des problèmes 145
 - lessivage 49
 - macronutriments
 - azote (N) 125
 - calcium (Ca) 126
 - magnésium (Mg) 126
 - phosphore (P) 125
 - potassium (K) 125–126
 - souffre (S) 126

- Nutriments (*continued*)
- micronutriments
 - bore (B) 127
 - chlore (Cl) 127
 - cobalt (Co) 127
 - cuivre (Cu) 127
 - fer (Fe) 126
 - manganèse (Mn) 127
 - molybdène (Mo) 127
 - nickel (Ni) 128
 - silice (Si) 128
 - sodium (Na) 128
 - zinc (Zn) 127
 - mobilité 146
 - pertes gazeuses 49
 - prélèvement 144
 - variétés locales et améliorées 146
- Nutrition des cultures
- caractéristiques, carences en nutriments pour les feuilles 146
 - conditions pour la croissance des cultures 145
 - fonctions, nutriments essentiels des cultures 143
 - micro-nutriments
 - concentration 147
 - symptômes et niveaux de toxicité 147
 - nutriments
 - carences 144–145
 - disponibilité 146
 - identification de problèmes 145
 - mobilité 146
 - prélèvement 144
 - variétés locales et améliorées 146
 - symboles et masses atomiques 143
 - tolérance à la saturation en Al 147
- Pehameter® 133, 156
- Petits exploitants 6
- Phosphate Naturel (PN) 36–38
- PN *voir* Phosphate Naturel
- Programmes de microfinance 92
- Proportion équivalente de terre (LER) 25
- Quatre « bons » (4R), gestion de l’engrais
- la bonne dose d’engrais
 - application 45
 - lignes directrices générales 44
 - réponses 44–45
 - techniques, application précise 46
 - la bonne méthode d’application 46–47
 - le bon moment, application 46
 - le bon type d’engrais 43–44
- Sol et production des cultures
- éléments constitutifs 120
 - fertilité 120
 - fraction minérale
 - sable, limon et argile 121
 - « test du toucher » 121–122
 - fraction organique
 - matière organique du sol (MOS) 123–124
 - minéralisation 123
 - nitrification 123
 - teneur en K, matières organiques 123
 - fonctions du sol 119–120
 - indicateurs de qualité 119
 - nutriments *voir* Nutriments
 - texture 121–122
- Système des Travailleurs Communautaires du Savoir 115
- Systèmes de petites exploitations agricoles 75
- Tarière Edelman 133, 154, 156
- Technologies de l’information et de la communication (TIC)
- accès à Internet 107
 - stockage de données 108–109
 - supports médiatiques 105
 - téléphone portables 106–107
 - vidéos 107–108
- Technologies GIFS, Afrique sub-saharienne
- problème, faible fertilité des sols 9
 - processus de prise de décisions
 - décisions opérationnelles 9
 - décisions stratégiques 9
 - décisions tactiques 9
 - solutions les mieux adaptées 9
 - solutions prometteuses 9
 - solutions toutes faites ou solutions magiques 9
- Texture du sol 121–122, 132–133
- TIC *voir* Technologies de l’information et de la communication (TIC)
- Utilisation d’engrais
- calendrier d’application d’engrais 152
 - facteurs de conversion des nutriments 148–149
 - guide pour le mélange d’engrais simples disponibles en Afrique sub-saharienne 150
 - nutriments secondaires 151
 - propriétés requises du phosphate naturel 153
 - recommandations pour une sélection de cultures 152
 - sources de phosphate naturel disponibles en Afrique sub-saharienne 153
 - teneur en éléments nutritifs disponible en Afrique sub-saharienne 149



Ce manuel présente la gestion intégrée de la fertilité des sols, communément appelée GIFS, comme un facteur clé de l'amélioration de la faible productivité des sols et des cultures en Afrique, surtout pour les principales cultures vivrières de base, à savoir: le maïs, le haricot, le riz, le manioc, les bananes, le sorgho, le millet et les autres cultures.

Il est destiné à la formation des vulgarisateurs sur les techniques de gestion intégrée de la fertilité des sols en Afrique sub-saharienne, et des agents impliqués dans le développement rural qui souhaiteraient en savoir plus sur les principes et pratiques GIFS.

Le présent manuel se veut également une introduction pratique à la GIFS pour les institutions d'enseignement, telles que les universités et les collèges techniques, les organisations impliquées dans l'élaboration des politiques agricoles et de développement rural qui ont besoin de ces documents de référence sur les techniques GIFS, ainsi que d'autres organisations gouvernementales et non gouvernementales (ONG) qui cherchent à mettre en œuvre la GIFS

Publié par Africa Soil Health Consortium (ASHC), cet ouvrage fait partie d'une série de documents et de publications sur la GIFS produits à l'intention des différents acteurs, notamment le personnel de vulgarisation, les petits exploitants, les agro-distributeurs, les décideurs politiques et les institutions de formation. Les autres publications comprennent les guides de culture et de nutrition des plantes, des notes de politique, des manuels de formation et des informations pratiques pour les vulgarisateurs et les agriculteurs. Veuillez visiter le site internet de l'ASHC pour de plus amples détails (www.cabi.org/ashc).

L'ASHC collabore avec des initiatives d'Afrique subsaharienne pour encourager la mise en œuvre de pratiques GIFS.

La coordination d'ASHC est assurée par CABI en partenariat avec des organisations internationales et nationales de la science et de l'agriculture avec l'aide de la Fondation Bill & Melinda Gates.



Le Consortium africain pour la santé des sols est coordonné par CABI. CABI est aussi l'éditeur de ce manuel.

La Section des Communications, le Consortium africain pour la santé des sols, CABI, CIRAF Complex, PO Box 633-00621 Nairobi, Kenya

Tél: +254-20-722 4450/62 Fax: +254-20-712 2150 E-mail: Africa@cabi.org

Site : www.cabi.org/ashc