

COTON-4



Manuel de bonnes pratiques agricoles sur le coton



Système de semis direct sous couverture végétale



INSTITUT D'ECONOMIE RURALE



**Entreprise Brésilienne de Recherche Agricole
Secrétariat des Relations Internationales
Embrapa Coton
Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de l'Approvisionnement
Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles
Institut d'Économie Rurale
Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement**

Système de semis direct sous couverture végétale

Embrapa
Brasília, DF, Brésil
2013

Vous pouvez obtenir cet ouvrage dans les centres ci-dessous :

**Institut National des Recherches
Agricoles du Bénin (INRAB)**

01 BP. 884 Cotonou
Tél. : (229) 2130-0264/(229) 2130-0326

**Institut de l'Environnement et
de Recherches Agricoles (INERA)**

O4 BP. 8645 Ouagadougou. 04
Tél. : +226 5034-0270/5034-0271
www.inera.bf

Institut d'Economie Rurale (IER)

Rua Mohamed V, BP 258, Bamako
Tél. : +223 2022-2606/2022-3775
www.ier.gouv.ml

**Institut Tchadien de Recherche Agronomique
pour le Développement (ITRAD)**

BP 5400 N'Djamena
Tél. : +235 252-0101/253-4163

Les centres responsables des contenus

Secrétariat des Relations Internationales

Embrapa Coton (www.cnpa.embrapa.br)

Institut National des Recherches Agricoles du Bénin

Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles

Institut d'Économie Rurale

*Institut Tchadien de Recherche Agronomique
pour le Développement*

**L'unité responsable de la coopération
technique internationale de l'Embrapa**

Secrétariat des Relations Internationales

L'unité responsable de l'édition

Embrapa Information Technologique

Coordination d'édition

Selma Lúcia Lira Beltrão

Lucilene Maria de Andrade

Nilda Maria da Cunha Sette

Supervision éditoriale

Josmária Madalena Lopes

Révision des textes

Rafael de Sá Cavalcanti

Normes bibliographiques

Márcia Maria Pereira de Souza

Graphisme et Couverture

Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Photo de couverture

Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

1^{ère} édition

1^{ère} impression (2013) : 3.000 exemplaires

Tous droits réservés

Toute reproduction de cette publication, en tout ou en partie,
constitue une violation des droits d'auteur (Loi n° 9.610).

Données internationales de catalogage avant publication (CIP)

Embrapa Information Technologique

Système de semis direct sous couverture végétale / [Fagaye Sissoko ... et al.]. –
Brasília, DF, Brésil : Embrapa, 2013.
85 p. : ill. color. ; 16 cm x 22 cm. – (Manuel de bonnes pratiques sur le coton)

ISBN 978-85-7035-191-3

I. Sissoko, Fagaye. II. Entreprise Brésilienne de Recherche Agricole. III. Secrétariat
des Relations Internationales. IV. Embrapa Coton. V. Ministère de l'Agriculture de
l'Élevage et de l'Approvisionnement. VI. Institut National des Recherches Agricoles
du Bénin. VII. Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles. VIII. Institut
d'Économie Rurale. IV. Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le
Développement.

CDD 631.51

© Embrapa 2013

Les auteurs

Fagaye Sissoko

Ingénieur agronome, doctorat en Sciences du Sol, responsable des essais agronomiques du Programme Coton, Institut d'Économie Rurale (IER), Centre Régional de Recherche Agronomique (CRRRA) de Sikasso, Sikasso, Mali
fagaye_sissoko@yahoo.fr

Bazoumana Koulibaly

Ingénieur agronome, doctorat unique (Sciences du Sol), chef de section agronomie et techniques culturales à l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles (DRREA), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso
bazoumana@hotmail.com

Gustave Dieudonné Dagbenonbakin

Ingénieur agronome, charge de Recherches en Fertilité des Sols et Nutrition des Plantes (CAMES), chef Division Agronomie, Cotonou, Bénin
dagust63@yahoo.fr

Michel Naïtormaïde

Ingénieur agronome, docteur en Développement Rural, Production végétale, Science du Sol, chef de Centre Régional de Recherche Agronomique (CRRRA), Station Bébédjia, Tchad
naitormaïde_michel@yahoo.fr

Reoungal Djinodji

Ingénieur agronome, système et master recherche en Agroéconomie, Master 2, chef de Programme Intensification, Diversification et Valorisation des Productions Végétales, Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement (ITRAD), Tchad
djinodji@yahoo.fr

Germain Fayalo

Ingénieur agronome, Protection des Végétaux, titulaire du D. E. A., Biologie Végétale Appliquée, Centre de Recherche Agricole Coton et Fibres Textiles (CRA-CF), Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), Parakou, Bénin
germayalo@yahoo.fr

Isidore Amonmide

Ingénieur agronome, responsable des essais agronomiques de la zone centre et sud du Bénin et responsable de l'Antenne centre et sud du Centre de Recherches Agricoles Coton et Fibres Textiles (CRA-CF), Cana, Commune de Zogbodomey, Bénin
amonmide2005@yahoo.fr

Karim Traore

Ingénieur agronome, Ph.D. en Production Ecology and Resources Conservation, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA), Direction Régionale de Recherches Environnementales et Agricoles (DRREA), Bobo-Dioulasso, Burkina Faso
karim_traore@hotmail.com

Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

Ingénieur agronome, docteur en Phytotechnie, chercheur à l'Embrapa Coton, Campina Grande, PB, Brésil
alexandre-cunha.ferreira@embrapa.br

Ana Luiza Dias Coelho Borin

Ingénieur agronome, docteur en Science du Sol, chercheur à l'Embrapa Coton, Campina Grande, PB, Brésil
ana.borin@embrapa.br

Gilvan Barbosa Ferreira

Ingénieur agronome, docteur en Sols et Nutrition des Plantes, chercheur à l'Embrapa Coton, Campina Grande, PB, Brésil
gilvan.ferreira@embrapa.br

Julio Cesar Bogiani

Ingénieur agronome, docteur en Agriculture, chercheur à l'Embrapa Coton, Campina Grande, PB, Brésil
julio.bogiani@embrapa.br

José Geraldo Di Stéfano

Ingénieur agronome, master em Développement Durable, coordinateur du Projet Coton-4 à Bamako, Mali, analyste à Secrétariat des Relations Internationales de l'Embrapa, Brasília, DF, Brésil
jose.distefano@embrapa.br

Fernando Mendes Lamas

Ingénieur agronome, docteur en Production Végétale, chercheur à l'Embrapa Agriculture Zone Ouest, Dourados, MS, Brésil
fernando.lamas@embrapa.br

Maria da Conceição Santana Carvalho

Ingénieur agronome, docteur en Sols et Nutrition des Plantes, chercheuse à l'Embrapa Riz et Haricot, Santo Antônio de Goiás, GO, Brésil
maria.carvalho@embrapa.br

Une histoire innovante

Le Brésil cherche à contribuer efficacement au développement durable en Afrique. La coopération technique brésilienne, dans un élan de solidarité et en l'absence de conditionnalités, consacre la moitié de son budget à ce continent. Quarante pays en bénéficient dans des domaines tels que la sécurité alimentaire, l'agriculture, l'éducation, les politiques sociales, le patrimoine historique et l'administration publique.

La croissance et le succès de la coopération internationale brésilienne avec l'Afrique peuvent s'expliquer par la manière dont cette activité est réalisée, avec la participation continue des autorités et des experts locaux. En outre, prévaut un souci permanent de toujours adapter nos expériences aux différents contextes et spécificités de chaque partenaire, ce qui rend unique chaque projet organisé par le Brésil, indépendamment du nombre de fois où il a déjà été mis en œuvre auparavant.

Parmi les initiatives dans l'agriculture, l'une des expériences les plus réussies de la coopération brésilienne est sans aucun doute le projet d'Appui au Développement du Secteur Cotonnier des Pays du Coton-4, provenant d'une demande émanant des membres du groupe (Bénin, Burkina Faso, Mali et Tchad) suite au contentieux portant sur le coton entre le Brésil et les États-Unis au sein de l'Organisation Mondiale du Commerce.

En assurant l'adaptation des variétés brésiliennes de coton, le transfert des techniques de plantation et de la recherche développée par le Brésil ainsi que la formation des experts des quatre pays, le Cotton-4 a été la première initiative issue de sa gamme de projets

structurants que l'Agence Brésilienne de Coopération du Ministère des Relations Extérieures a réalisé sur le continent africain. En trois ans d'existence, le projet a permis d'adapter aux conditions naturelles de la région dix variétés de coton du Brésil tout en organisant des cours de formation dans les domaines du semis direct, l'amélioration génétique et la lutte intégrée contre les ravageurs.

Ce volume résume, en substance, la connaissance produite et consolidée à travers cet important projet de coopération. Cette publication jouera certainement un rôle central dans la diffusion de nouvelles techniques de culture de coton en collaboration avec les chercheurs et producteurs de ces pays. Je suis convaincu que l'expérience résumée ici se traduira par une augmentation de la productivité et de la qualité des cultures, générant ainsi une augmentation des revenus et une amélioration significative du niveau de vie de la population. Il n'est pas inutile de rappeler, l'objectif le plus important quant à notre rapprochement avec l'Afrique : la construction dans nos régions, de sociétés sachant allier la paix, le développement durable et la justice sociale en faveur d'un ordre international plus démocratique.

Antonio de Aguiar Patriota
Ministre des Relations Extérieures

Présentation institutionnelle

Le projet Appui au Développement du Secteur Cotonnier des Pays du Coton-4, qui se trouve maintenant à sa fin, est l'une des initiatives les plus ambitieuses et les plus réussies de l'Agence Brésilienne de Coopération du Ministère des Relations Extérieures dans le cadre de la coopération Sud-Sud. Au cours de ses quatre années d'existence, il a été responsable de la formation de centaines de techniciens et de l'adaptation de variétés brésiliennes de coton aux conditions naturelles de la région. Plus important encore, le projet a lancé un nouveau modèle de coopération, non seulement au niveau des résultats attendus, mais aussi par le modèle participatif et l'engagement rencontrés au sein de chaque institution participante.

Le Cotton-4, qui a débuté en 2009, a constitué le premier « projet structurant » coordonné par l'ABC et exécuté par l'Entreprise Brésilienne de Recherche Agricole (Embrapa). Durant cette période d'exécution, les chercheurs de l'Embrapa ont mis à disposition des informations, des techniques et des connaissances importantes dans les domaines du semis direct, l'amélioration génétique et la lutte intégrée contre les ravageurs qui ont été consolidées au Brésil et qui pourront être incorporées au système de production africain moyennant la réalisation d'ajustements et adaptations locales tout en respectant l'identité socioculturelle et les caractéristiques éda-phoclimatiques de chaque pays.

Le nom de « projets structurant » que certaines initiatives de coopération menées par l'ABC reçoivent, se justifie par la création de centres de formation permanents, qui permettent l'augmentation des résultats et du nombre de bénéficiaires. Ces structures agissent également, de façon indirecte tel un facteur de renforcement des

Etats et leurs capacités institutionnelles à travers un approvisionnement continu en ressources humaines qualifiées et l'intégration nationale, en raison de l'échange de techniques et de technologies provenant de l'ensemble du territoire.

Dans le cas de la station d'expérimentation revitalisée de Sotuba, au Mali, qui sert de siège au projet Coton-4, son rôle revêt une importance particulière. Bien qu'il existe des unités de démonstration de recherche développée au Bénin, au Burkina Faso et au Tchad, la station d'expérimentation revitalisée qui est située près de Bamako, fonctionne comme une grande vitrine des technologies de l'Embrapa, mais également comme un centre de diffusion de ces connaissances pour les pays de la région.

Depuis 2011, toutes les activités de formation sont menées au sein de la station avec des experts des quatre pays. À la fin de l'année 2012, quinze cours dans les domaines du semis direct, de l'amélioration génétique et de la lutte intégrée contre les ravageurs ont été conclus, impliquant environ deux cent cinquante techniciens. L'utilisation de la station expérimentale comme lieu d'apprentissage revêt un aspect stratégique, servant à la fois de rapprocher les techniciens des pays participants et de les aider à se familiariser avec l'emplacement et les équipements qu'ils continueront d'utiliser ensemble après l'achèvement du projet.

La présente publication est le résultat des essais adaptatifs effectués ainsi que de l'échange de connaissances réalisé entre le Brésil par le biais de l'Embrapa et les pays du C-4, par le biais de leurs institutions partenaires du Projet: Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles (INERA), du Burkina Faso, Institut Tchadien de

Recherche Agronomique pour le Développement (ITRAD) et l'Institut d'Economie Rurale (IER), du Mali.

Ce Manuel des Bonnes Pratiques Agricoles fonctionnera comme un véhicule didactique fondamental contenant des diagrammes, des photos et des explications faciles à comprendre afin de former des chercheurs et des démultiplicateurs. De cette façon, il pourra être distribué en cours et utilisé comme matériel de référence et de soutien pour les activités d'assistance technique et de vulgarisation rurale, en faisant part des expériences du projet dans chaque région de production des quatre pays.

C'est une immense satisfaction pour nous de pouvoir célébrer la remise de cette publication, dans la certitude qu'elle sera chargée de s'assurer que les bonnes pratiques du projet C-4 ne disparaissent pas avec l'achèvement de ses activités, mais que bien au contraire elles continuent à produire leurs fruits tout en ayant un impact positif sur la vie des personnes.

Fernando José Marroni de Abreu
Directeur de l'ABC

Maurício Antônio Lopes
Président de l'Embrapa

Sommaire

Introduction	15
L'évolution des systèmes de préparation du sol et les pratiques de conservation des sols.....	18
Le système conventionnel de préparation du sol	18
La traction motorisée	20
Le système de travail minimum du sol	22
Le système de semis direct sous couverture végétale (SCV)	23
Les pratiques conservatrices du sol	24
Les pratiques végétales	26
Les pratiques édaphiques.....	27
Les pratiques mécaniques	27
Le principe de base du semis direct sous couverture végétale.....	29
Le travail minimum du sol (ouverture des poquets)	29
La couverture du sol.....	29
La rotation des cultures.....	36
Les avantages du système de semis direct sous couverture végétale.....	38
La réduction des pertes du sol et des nutriments par érosion	38
La conservation du sol et de l'eau	38
L'amélioration graduelle de la fertilité du sol	39
L'augmentation de la diversité biologique des sols	40
L'exploration des différentes couches du sol	41
Le recyclage des nutriments par les racines des plantes de couverture	42
La réduction de l'incidence des mauvaises herbes	44
L'augmentation des teneurs en matière organique du sol	45
L'importance de la matière organique du sol.....	47
Le rôle de la MOS sur les propriétés chimiques	49
Le rôle de la MOS sur les propriétés physiques	49
Le rôle de la MOS sur les propriétés biologiques.....	52
Les cycles de l'énergie et des nutriments	53
La gestion de la fertilité du sol en semis direct.....	57
La demande en matière de nutriments par les plantes du système	57
Les symptômes des déficiences en nutriments	63

L'évaluation de la fertilité du sol	71
L'échantillonnage de sol	76
La procédure d'échantillonnage de sol	78
L'interprétation des résultats des analyses de sol	82
La fertilisation du système de production	83
Références	85

Introduction

Le sol représente un bien précieux ayant besoin d'être conservé et protégé afin d'assurer une exploitation continue, aussi bien pour les générations actuelles que pour les générations futures. Par conséquent, une gestion appropriée du sol doit être envisagée avec des pratiques agricoles permettant de procurer les conditions favorables au développement et à la production des cultures, mais aussi d'assurer le maintien et l'amélioration de son potentiel de production au fil du temps.

La bonne gestion et préservation du sol est la base d'une agriculture durable car il n'y a pas de production agricole durable si celle-ci se fait sur un sol présentant des problèmes d'érosion, de dégradation et de faible fertilité. Cette gestion permet de protéger le sol, les sources d'eau et leurs réservoirs, la faune et la flore, et notamment d'optimiser les ressources en matière de fertilisants tant organiques que minéraux.

Pour procéder à la gestion appropriée du sol, il faut connaître ses caractéristiques et ses contraintes, mais il faut également planifier l'usage qui permet de mettre en place des pratiques de conservation telles que : les méthodes de lutttes antiérosives ; la rotation des cultures ; l'utilisation des plantes de couverture et la gestion des résidus végétaux ; la fertilisation organique ; la correction de la fertilité du sol ; la fertilisation en vue d'entretenir les cultures.

La préparation du sol comprend les opérations ayant lieu avant le semis. Ces opérations ont pour but d'obtenir les conditions appropriées au semis, à la germination, à la levée, à l'établissement des plantules et au développement de la culture. La gestion du sol doit se faire en vue de garder sa qualité, d'éviter sa dégradation, d'éviter

le transport des particules, de protéger sa structure, d'augmenter l'infiltration d'eau, afin de réduire au minimum l'érosion. En revanche, une mauvaise préparation entraînera une très rapide dégradation physique, chimique et biologique du sol, donc une perte progressive de son potentiel de production et une augmentation des coûts liés à la production des cultures.

La décision concernant le système de gestion à adopter relève de plusieurs facteurs, dont les caractéristiques du sol, le relief et le climat de chaque région. Les conditions climatiques locales (régime des pluies, température, radiations solaires), de sol (texture, structure et fertilité), ainsi que le niveau d'infestation de mauvaises herbes, la quantité et la qualité des résidus de récolte, les équipements mécanisés disponibles, devront orienter le choix du système de gestion permettant d'assurer les conditions de semis, de développement et d'obtention d'une bonne récolte, mais aussi de protéger le sol.

Suite à l'évolution des systèmes de production, les pratiques de conservation telles que le labour minimum et le système de semis direct, où les résidus végétaux restent sur la surface du sol, permettent de ralentir le processus de décomposition, c'est à dire de favoriser l'accumulation de la matière organique, donc d'améliorer la capacité de production. Le non-labour du sol permet d'améliorer son agrégation, son infiltration et sa teneur en matière organique. Le taux de décomposition peut être réduit à moitié et, selon le schéma de rotation de cultures retenu, il est possible d'optimiser les avantages grâce à un apport plus important de biomasse, mais aussi à une exploitation de différentes couches de sol, à une fixation biologique de l'azote et à une diminution des problèmes phytosanitaires.

Dans de nombreux sols tropicaux, l'apport d'éléments fertilisants est insuffisant et ne permet pas de satisfaire les besoins des

cultures. Dans un tel contexte, la gestion efficace de la fertilisation organique ou minérale est très importante pour l'augmentation de la productivité, la rentabilité et la durabilité de la production au cours des années.

Fruit du projet « Appui au développement du secteur cotonnier aux pays du C-4 (Bénin, Burkina Faso, Tchad et Mali) », ce travail a pour but de décrire les bonnes pratiques de gestion et de conservation du sol selon le système de semis direct sous couverture végétale (SCV). Compte tenu de la réalité des pays du C-4, il est également question des pratiques de gestion et de conservation du sol selon le système de préparation conventionnel. Les fertilisations organique et minérale seront également évoquées dans ce travail en fonction de leur intérêt pour l'agriculture des pays du C-4.

L'évolution des systèmes de préparation du sol et les pratiques de conservation des sols

Le système conventionnel de préparation du sol

La préparation du sol est un ensemble d'opérations ayant lieu avant le semis et dont l'objectif est de favoriser le semis, la germination et le développement des plants.

Le système conventionnel de préparation et de conservation du sol comprend toutes les pratiques utilisées pour ameublir le sol : labour simple, bêchage, binage, hersage, labour profond (à la charrue), etc. Lorsque le travail du sol est fait avec précaution, il peut favoriser l'aération, l'infiltration et le développement des racines, l'activité des organismes du sol, mais il peut être également destiné à incorporer les mauvaises herbes, les résidus de récolte et le fumier de ferme, entre autres.

Il n'y a pas une façon unique de travailler le sol, mais quelques options. Selon le système de culture, le type de sol, le climat, le niveau d'infestation de mauvaises herbes, la quantité de résidus de récolte et les outils dont on dispose, des modèles appropriés de travail du sol doivent être développés ou améliorés, afin de minimiser l'impact négatif de la préparation du sol.

Le labour peut être manuel, en traction attelée ou en traction motorisée. Le labour manuel se fait sous forme d'une préparation sommaire du sol ou travail minimum du sol. En principe, le travail du sol doit retourner la couche superficielle du sol et l'ameublir dans les

premiers centimètres. Le labour manuel est fait d'habitude avec une houe ou un outil semblable. Le labour s'effectue dès les premières pluies qui le rendent possible.

Pour la préparation conventionnelle du sol, on utilise des outils (Figure 1) demandant un effort important ou un effort moins important en fonction de la teneur en eau du sol, de sa texture, du pourcentage de matière organique ou de la présence importante ou non de mauvaises herbes.

La préparation du sol doit être faite quelques jours avant le semis pour favoriser la décomposition des débris végétaux. La croissance des cotonniers en ressent énormément.

Outils appropriés pour le travail du sol

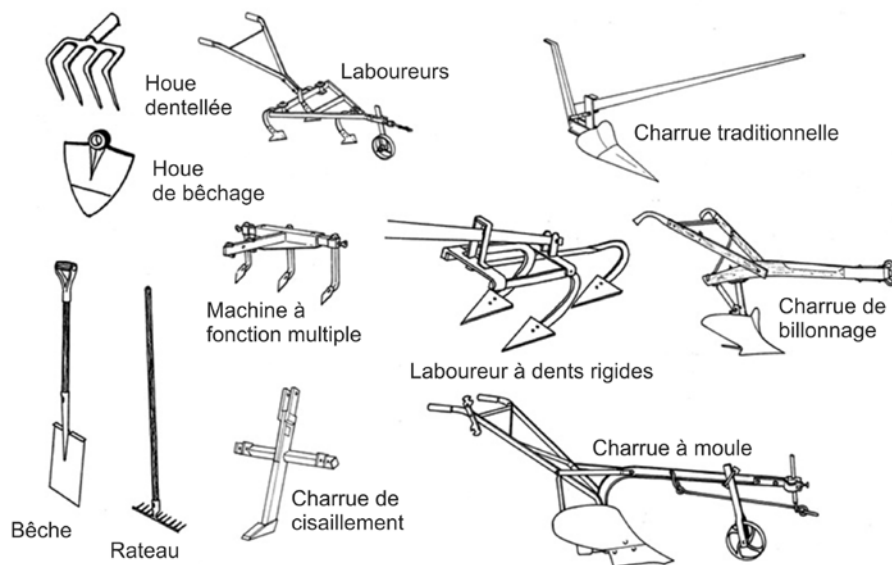


Figure 1. Des outils manuels ou à traction animale destinés à la préparation conventionnelle et minimum du sol.

Source : Carruthers et Rodriguez (1992).

La traction attelée permet de faire labour à plat, le billonnage, le scarifiage, le labour cloisonné. Le labour à la culture attelée s'exécute avec des charrues à socs, à versoir de scarificateur, de décompacteur tirés par des animaux dressés à cet effet (Figures 1 et 2). Ce labour doit être profond pour enfouir les résidus de récolte, le fumier organique et si possible les mauvaises herbes.

Pour le labour à plat, on retourne correctement le sol et on procède ensuite au hersage pour casser les grosses mottes et aplanir le sol pour un bon lit de semis et de meilleures conditions d'entretien.

La traction motorisée

La traction motorisée (Figure 3) permet aussi de réaliser le labour à plat, le billonnage, le pulvérisage. On utilise à cet effet la charrue à disque, la charrue à soc et les pulvérisateurs. Les charrues à disques sont utilisées dans les sols présentant des obstacles, que sont les pierres, les racines ou les souches, car les risques de casse sont moins à craindre qu'avec une charrue à soc.

La préparation du champ a pour but d'obtenir un sol suffisamment meuble avec des mottes appropriées. Si la pression des mauvaises herbes est forte, le champ peut être préparé plus tôt permettant ainsi aux graines des mauvaises herbes de germer avant que la culture ne soit semée. Un labour peu profond du sol, quelques jours après, suffit pour éliminer les mauvaises herbes. Dans les régions où l'accumulation d'eau est un problème, la préparation du sol peut consister en la mise en place de buttes et de sillons (Figure 4).



Photo : José Geraldo Di Stéfano

Figure 2. La préparation du sol moyennant la traction animale.



Photo : José Geraldo Di Stéfano

Figure 3. La préparation du sol avec une traction motorisée.

Photo : José Geraldo Di Stefano



Figure 4. Des sillons et des buttes en préparation conventionnelle du sol.

Le système de travail minimum du sol

Le travail minimum est une alternative conservatrice par rapport au système conventionnel de préparation du sol. Son objectif est de préparer le sol, mais tout en réduisant son niveau d'ameublissement et en utilisant le scarificateur, c'est à dire on ne fait que couper le sol sans le retourner afin que les résidus de récolte restent en surface, permettant la protection de la superficie contre l'érosion et l'augmentation de l'infiltration.

Certains outils utilisés pour la préparation conventionnelle du sol (Figure 1) peuvent être utilisés pour le système de travail

minimum du sol, à condition que les opérations entraînent une faible destruction du sol. Toute activité de travail du sol a un impact plus ou moins destructif sur sa structure. Dans les sols tropicaux, le labour régulier accélère la décomposition de la matière organique qui peut conduire à des pertes de nutriments. Le mélange de couches du sol peut sévèrement nuire à certains organismes du sol. Il peut favoriser la formation de semelle de labour. Le sol après labour est très enclin à l'érosion si l'on le laisse nu avant le début des grandes pluies.

Les systèmes de non-labour aident d'une part à créer une structure naturelle du sol avec une couche superficielle friable et riche en matière organique et en organismes. Les pertes en éléments nutritifs sont réduites au minimum puisqu'il n'y a aucune décomposition rapide de matière organique. De plus, les éléments nutritifs sont captés par un dense réseau racinaire. L'érosion ne sera pas un problème tant qu'il y a une couverture permanente du sol ou un apport suffisant de matière organique. Enfin, les agriculteurs peuvent économiser beaucoup de d'énergie et utiliser le moins possible de main d'œuvre.

Le système de semis direct sous couverture végétale (SCV)

Le système de semis direct est un système de gestion important pour les régions tropicales. Il consiste à procéder au semis sans retourner le sol et à enfouir les graines dans les sillons dont la largeur et la longueur sont suffisantes pour leur contact avec le sol.

Parmi ses fondements on y retrouve :

1. Le travail minimum du sol pour le semis (Figure 5).
2. Le maintien des résidus de cultures en vue d'une couverture permanente du sol (Figure 6).

Photo : José Geraldo Di Stéfano



Figure 5. Le travail minimum du sol en vue de l'ouverture des poquets de semis.

3. La rotation des cultures, en combinant différentes espèces afin de produire de la paille pour la couverture du sol, d'accroître le cycle de nutriments et d'empêcher le cycle de ravageurs, de maladies et de mauvaises herbes (Figure 7).

Les pratiques conservatrices du sol

L'érosion est un problème important touchant beaucoup d'exploitations agricoles dans les zones tropicales. Elle peut être naturelle et est un phénomène lent ou accéléré du fait des mauvaises pratiques humaines. Elle est accélérée lorsque l'équilibre entre le sol et la végétation est brusquement bouleversé. Ce bouleversement peut être provoqué par une calamité naturelle (tremblement de terre, éruption d'un volcan), un brusque changement de climat ou



Photos (A, B et C) : José
Geraldo Di Stéfano

Photo : Alexandre Cunha de
Barcellos Ferreira

Figure 6. Couverture permanente du sol après la récolte du maïs (A), en saison sèche (B) et au cours de la culture du coton (C et D).



Photo : José Geraldo Di Stéfano

Figure 7. Zone à rotation de cultures : du maïs (à droite et au fond), du niébé (à droite et devant) et du coton (à gauche), à Bamako, Mali, 2011.

le plus souvent dans l'action de l'homme qui s'attaque à la couverture végétale naturelle, soit pour en exploiter les produits, soit pour étendre ses cultures ou son élevage. La destruction de la végétation naturelle expose le sol dénudé à l'action de l'eau et du vent qui sont les principaux facteurs de l'érosion.

Par principe, les terrains doivent être utilisés en fonction de leur aptitude agricole supposant la disponibilité appropriée de forêts, de cultures pérennes, de cultures saisonnières, de pâturages, etc., permettant donc de profiter de leur potentiel en matière de zones et de leur protection. Ces terrains doivent donc être utilisés suivant les pratiques conservatrices.

Le choix de méthodes et de pratiques conservatrices du sol se fait en fonction des aspects environnementaux et socio-économiques relevant de chaque propriété mais aussi de chaque région. Chaque pratique appliquée de manière séparée ne permet de faire face au problème que partiellement. Pour faire face à l'érosion de manière appropriée, il faut adopter simultanément un ensemble de pratiques, à savoir des pratiques végétatives, édaphiques et mécaniques.

Les pratiques végétatives

Les pratiques végétatives comprennent : la couverture végétal, le semis à temps opportun et à densité optimale, la rotation de cultures, incluant une jachère améliorée dans la rotation, les bandes enherbées, l'introduction des légumineuses à grande échelle dans la rotation (cultures fourragères, haricots, pois de terre, entre autres), le brise-vent, les cultures en bandes (une bande à haricots et une bande à coton), les cultures en association simples (une bande à côté de l'autre : du maïs avec de l'*Urochloa*, anciennement dénommée de *Brachiaria*, entre autres), éviter les feux de brousse et l'usage de la paille.

Les pratiques édaphiques

Ces pratiques occasionnent des changements sur le système de culture afin de contrôler l'érosion et d'accroître la fertilité du sol. Parmi ces pratiques on y trouve : le contrôle des feux de brousse, l'engrais vert, la correction chimique des sols et la fertilisation minérale et organique.

Les pratiques mécaniques

Ces pratiques permettent un changement très important au niveau des champs : le choix des zones de passage, le semis à plat, le terrassement, le buttage à sillons cloisonnés (au moment du dernier sarclage), les cordons pierreux et le contrôle des ravines.

Concernant ces pratiques, une attention particulière doit être accordée au semis à plat. Dans le cadre de cette pratique, tous les labours sont effectués à plat. Dans une culture à plat, on crée des obstacles à l'écoulement de l'eau, en réduisant sa vitesse et en augmentant son infiltration (Figure 8). Il s'agit là d'une pratique de base qui s'avère l'une des plus importantes en matière de conservation des sols. Sur les champs situés en pente, des labours mal faits peuvent favoriser fortement la création de ravines d'érosion. C'est le cas lorsque la technique de labour appliquée par le cultivateur entraîne la formation de rigoles descendantes dans lesquelles l'eau peut s'écouler et prendre de la vitesse. Un bon labour sur une terre en pente est celui qui retient l'eau pour ne pas lui permettre de s'écouler. Mais attention, si les sillons ne sont pas bien cloisonnés, l'eau n'est pas emprisonnée : elle s'écoule de côté et forme des ravines qui se creusent chaque fois qu'il pleuvra.

Photo : José Geraldo Di Stefano



Figure 8. Le semis dans une parcelle labourée en fonction des courbes de niveau en tant que stratégie permettant de retenir les eaux de ruissellement.

Une fois le ruissellement ralenti par les dispositifs antiérosifs, l'infiltration des pluies dans les sols agricoles doit être favorisée. En plus, il faudra tout faire pour maintenir la fertilité et la stabilité structurale de ces sols. Si l'agriculteur ne tient pas suffisamment compte de l'effet de ses cultures sur le sol, il risque d'avoir un sol dur et stérile, entouré de dispositifs antiérosifs.

Le principe de base du semis direct sous couverture végétale

Le semis sous couverture végétale (SCV) a été développé aux USA, en Australie et au Brésil, pour limiter l'érosion des terres et diminuer l'utilisation des machines agricoles. Son expansion a été favorisée par l'utilisation des herbicides (glyphosate), le développement des machines et des technologies agricoles permettant le semis direct.

Il vise la rentabilité et la durabilité de l'activité agricole ainsi que la protection de l'environnement, à travers la mise en œuvre simultanée de trois principes agronomiques, à savoir : le travail minimum du sol pour le semis, le maintien des résidus de cultures pour une couverture permanente du sol et la rotation des cultures.

Le travail minimum du sol (ouverture des poquets)

Le travail minimum du sol et la mise en place des cultures par le semis direct : la semence est placée directement dans le sol sans un retournement préalable, c'est à dire sans le labour conventionnel. Seul un petit sillon ou un trou est ouvert, de profondeur et largeur suffisantes, avec des outils spécialement conçus à cet effet, pour garantir une bonne couverture et un bon contact de la semence avec le sol (Figure 9).

La couverture du sol

Une couverture morte ou vivante est maintenue en permanence sur le sol. Plusieurs types de plantes de couverture peuvent être utilisés (des graminées et/ou des légumineuses). Le choix de la

Photo : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira



A



B

Photo : José Geraldo Di Stefano

Figure 9. Le semis direct du cotonnier, avec la mobilisation minimale du sol, sur la ligne (A) ou le poquet (B) de semis.

plante de couverture dépend de l'usage que le producteur veut faire de la biomasse. Le choix des plantes de couverture est déterminant : les plus efficaces sont celles capables d'assurer le mieux les fonctions à la fois de protection et de restructuration des sols, de recyclage profond des nutriments.

Les producteurs qui font de l'intégration agriculture et élevage utiliseront des graminées (*Urochloa ruziziensis*) et des légumineuses (mucuna) qui sont bien appréciées par les animaux, en association avec le maïs ou le sorgho. Les résidus de sorgho se conservent mieux que ceux du maïs, par contre les résidus de maïs sont mieux appréciés par les animaux.

La date de semis des plantes de couverture sous le maïs ou sous le sorgho peut varier selon les régions et le climat. Dans les conditions du Mali, la meilleure date d'insertion des plantes de couverture se situe vers le 14^{ème} jour après le semis du maïs. Dans d'autres pays, il a été montré que la meilleure date d'insertion des plantes de couverture sous sorgho se situe vers le 28^{ème} jour après le semis. Donc en fonction de la culture principale, de la région et du climat, la date d'insertion des plantes de couverture peut changer. Si le semis de la plante de couverture se fait à la fois ou quelques

jours après celui de la culture principale (maïs ou sorgho), ces deux cultures peuvent voir leur productivité diminuer en fonction d'une compétition importante avec les plantes de couverture. Mais si le semis de la plante de couverture se fait très tardivement, elle n'aura pas les moyens de produire de la biomasse suffisante permettant de protéger le sol, après la récolte de la culture principale.

Les caractéristiques souhaitables des plantes de couverture sont les suivantes : être faciles à obtenir et à s'adapter au milieu ; avoir une croissance rapide de la partie aérienne et des racines ; avoir une tolérance élevée au déficit hydrique ; en plus de produire des quantités suffisantes de matière sèche, elles doivent assurer une bonne couverture du sol tout en permettant sa protection et sa persistance pour un semis direct du cotonnier l'année suivante ; ne pas être hôtes de maladies et de ravageurs des cultures composant le système de production ; obtention et acquisition facile de leurs graines ; si possible, elles doivent servir à l'alimentation humaine et animale ; les espèces doivent contribuer à la gestion des mauvaises herbes (Figure 10) et ne doivent pas devenir envahissantes dans les cultures suivantes ; et être d'un dessèchement facile pour un semis des cultures en rotation.

L'association des légumineuses et des graminées est très positive pour les systèmes. Ce système de culture intégrée (légumineuses + graminées) permet d'enrichir le sol en azote, d'augmenter le taux de matière organique et d'améliorer la structure du sol.

Les systèmes de semis direct suivants pourraient être installés en priorité :

- Maïs + *Urochloa ruziziensis* + *Crotalaria spectabilis* (Figure 11).
- Maïs + *Urochloa ruziziensis* + *Cajanus cajan* (Figure 12).
- Maïs + *Urochloa brizantha* (Figure 13).
- Maïs + *Urochloa ruziziensis* (Figure 14).

Photo : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira



Figure 10. Le contrôle de mauvaises herbes effectué grâce à la matière sèche d'*Urochloa ruziziensis* (résidus).



Figure 11. L'association de maïs avec des plantes de couverture – graminées (*Urochloa ruziziensis*) + légumineuses (*Crotalaria spectabilis*) au début du développement (A et B), à la fin du cycle (C) et après la récolte de maïs (D).

Photos : José Geraldo Di Stéfano



Figure 12. La partie aérienne de l'association de maïs et des plantes de couverture – graminées (*Urochloa ruziziensis*) + légumineuses (*Cajanus cajan*) au début du développement (A) et à la fin du cycle (B) du maïs.



Photo : Ana Luiza Dias Coelho Borin

Figure 13. Du maïs en association avec *Urochloa brizantha* cv. Piatã. Sotuba, Mali, 2011.



Photo : José Geraldo Di Stefano

Figure 14. Du maïs en association avec *Urochloa ruziziensis*. Sotuba, Mali, 2011.

La rotation des cultures

La rotation consiste à utiliser différentes espèces (de différentes familles) dans une même zone dans différentes saisons et années agricoles (Figures 15 et 16). Les rotations recommandées sont celles qui peuvent apporter des avantages aux producteurs et aux systèmes de production. Lorsqu'il choisit les cultures qui composeront son système de production, l'agriculteur se doit de considérer celles qui, en plus de leur rentabilité, contribuent d'une certaine manière à l'amélioration du système, en inhibant les ravageurs et les maladies pour les cultures suivantes, en recyclant les nutriments des couches les plus profondes du sol ou même en fixant l'azote comme dans les cas des légumineuses. Dans les conditions Africaines, c'est l'agriculture de subsistance qui est généralement pratiquée, les producteurs ont tendance à utiliser des cultures qui peuvent leur apporter un complément alimentaire. Ils ont tendance à choisir les légumineuses qui sont consommées.

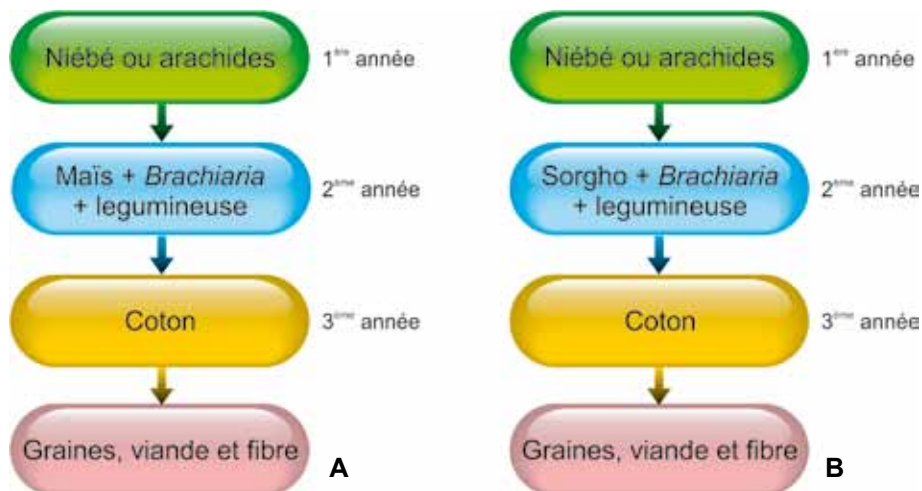


Figure 15. La possibilité de rotation annuelle de cultures dans le cadre du système de semis direct, dans le pays du C-4 (A), et à l'égard des régions des pays du C-4 où il pleut moins (B).

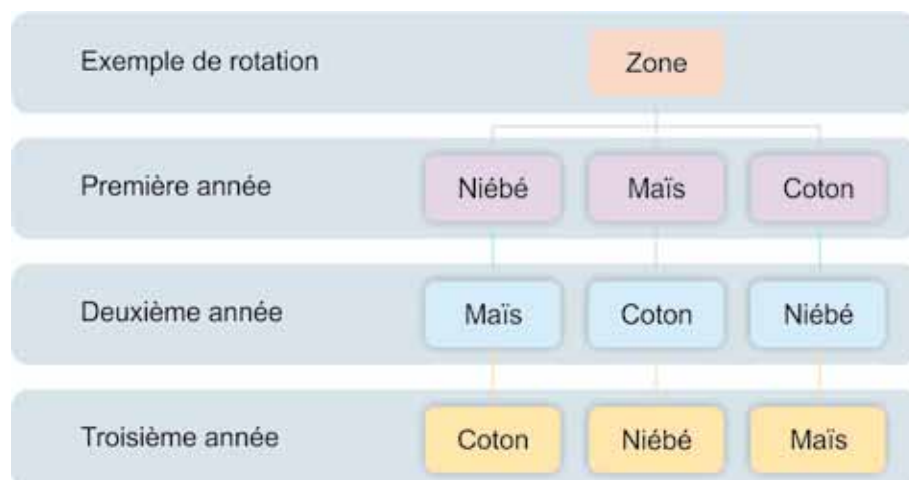


Figure 16. Schéma de rotation des cultures sur trois ans dans une exploitation.

Les avantages du système de semis direct sous couverture végétale

La réduction des pertes du sol et des nutriments par érosion

L'érosion (hydrique, éolienne) est déclenchée par une combinaison de facteurs : pentes, agressions climatiques, mauvaise utilisation des terres, sol nu, etc. Elle est réduite par la présence d'une couverture végétale, vivante ou morte, et par l'absence de préparation du sol. La couverture végétale diminue l'effet mécanique des gouttes de pluie sur le sol et y améliore l'infiltration de l'eau, ralentissant le ruissellement et les pertes en sols.

La biomasse végétale en couverture sur le sol est décomposée par les organismes vivants du sol. L'humus obtenu avec cette décomposition joue un rôle très important dans la stabilisation de la structure du sol. De plus, la présence d'un couvert végétal limite le dessèchement de la couche superficielle (meilleure humidité et températures moins élevées). Dans les parcelles en SCV, on réduit le ruissellement, on améliore la gestion de l'eau, on protège le sol contre la dégradation physique.

La conservation du sol et de l'eau

En période de sécheresse prolongée, le sol est plus humide sous SCV car il y a suppression du ruissellement de surface, réduction de l'évaporation et augmentation de la capacité de rétention en eau (Figure 17). L'utilisation de plantes de couverture permet aussi

de capter l'humidité profonde par leurs racines, améliorant le bilan hydrique.



Photos : José Geraldo Di Stefano

Figure 17. L'amélioration de l'infiltration et de la rétention d'eau dans le sol en fonction de la matière sèche résiduelle des espèces de couverture.

L'infiltration permet de recharger les nappes phréatiques. La modification et l'amélioration du bilan hydrique pour les cultures permettent de satisfaire les besoins en eau des cultures.

L'amélioration graduelle de la fertilité du sol

L'utilisation de plantes de couverture permet d'explorer les différents horizons du sol, mais aussi d'absorber les nutriments des couches plus profondes du sol pouvant être mis à la disposition des cultures susceptibles d'être plantées. En plus, cette utilisation permet d'insérer des espèces légumineuses pour la production de la paille, ou comme culture principale destinée à la production des graines, mais aussi d'augmenter la teneur en N dans le sol compte tenu de la caractéristique des légumineuses à fixer de l'azote.

L'augmentation de la diversité biologique des sols

Dans le cadre du système de semis direct, la mise à disposition de matière organique sur la surface du sol, la grande quantité de racines et une teneur en eau plus importante favorisent, au fil du temps, la diversité des macro-organismes et des micro-organismes du sol, en comparaison à des sols labourés de manière conventionnelle. Pour ce qui est de la diversité biologique importante de l'écosystème, celui-ci se trouve plus proche de l'équilibre.

La vie biologique dans les parcelles en semis direct était nettement supérieure à celle observée dans les parcelles labourées. Il y a une intense activité des termites dans les parcelles avec des résidus en couverture pendant toute la saison sèche (Figures 18 et 19).

Photo : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira



Figure 18. L'action de termites décomposeurs sur les résidus végétaux à Sotuba, Mali.



Photo : José Geraldo Di Stefano

Figure 19. L'action des termites décomposeurs sur les résidus végétaux et sur les vers de terre à Sotuba, Mali.

L'exploration des différentes couches du sol

Dans le cadre du système de semis direct, grâce à la rotation de cultures et au semis d'espèces destinées à la formation de la paille, des espèces végétales présentant différentes caractéristiques structurales et morphologiques de racines sont utilisées (Figure 20). Ainsi, au cours des années, les différentes espèces semées, pour explorer les différentes couches du sol, améliorent les caractéristiques physique, chimique et biologique du sol.



Figure 20. Les racines de la graminée *Urochloa ruziziensis* (A) et de l'association légumineuses avec des graminées (B). Sotuba, Mali.

Le recyclage des nutriments par les racines des plantes de couverture

La culture d'espèces pour la formation de la paille et de couverture du sol ayant lieu avant le semis du coton permet d'absorber et d'établir le cycle des nutriments disponibles dans le sol (Figure 21). Grâce au processus de décomposition de la matière sèche résiduelle, les nutriments pourront être mis à disposition au cours des années et utilisés pour les cultures en succession, dont le cotonnier. La paille laissée sur la surface du sol renferme des quantités importantes de nutriments, restant provisoirement indisponibles aux plantes en développement, semées directement sur la paille. La période, pour que les nutriments deviennent disponibles pour la culture en succession, dépend de la quantité de biomasse produite, des caractéristiques des plantes à l'origine de cette paille, de la gestion choisie, du taux de décomposition et notamment des conditions climatiques et de l'activité biologique.

Les bombes biologiques dês nutriments

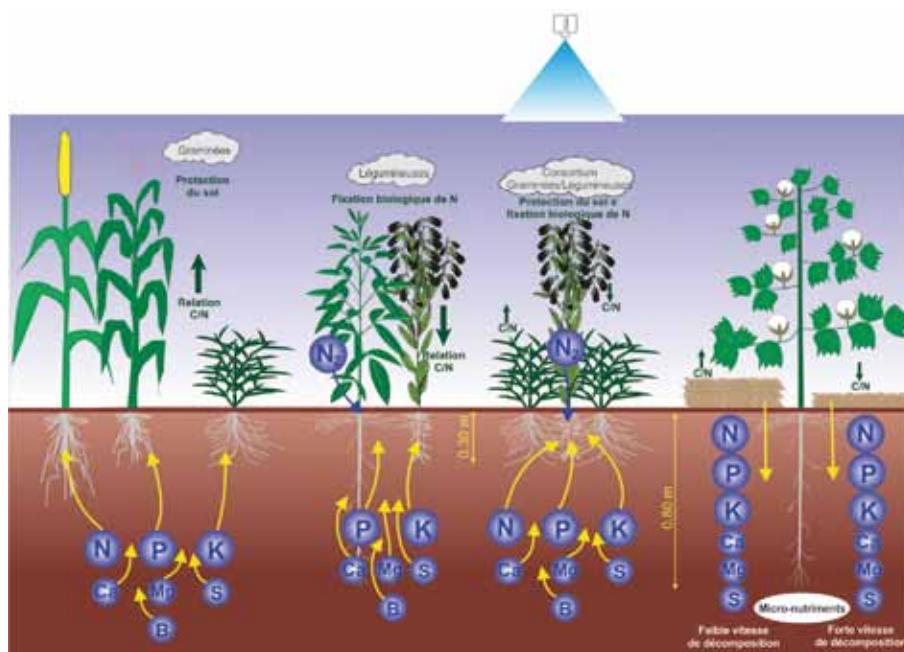


Illustration : Sebastião José de Araújo

Figure 21. Schéma illustrant le rôle des espèces pour la formation de la paille et de la couverture du sol, en particulier des graminées (mil et maïs) et des légumineuses (pois d'Angole et crotalaire) plantées toutes seules ou en association présentant des caractéristiques d'absorption et de cycles de nutriments, pour le cotonnier.

L'introduction de légumineuses ou de plantes susceptibles de recycler l'azote, telles que les plantes de couverture, améliore la fertilité du sol, met à disposition de l'azote pour les autres cultures et peut diminuer la dose de N de 50%. En plus, les légumineuses, à l'instar du pois d'Angole et des crotalaires, présentent une très bonne capacité d'enracinement en profondeur ; ceci montre son potentiel d'absorber de l'eau, mais aussi d'établir le cycle des nutriments des horizons plus profonds du sol.

La réduction de l'incidence des mauvaises herbes

L'enherbement est moindre dans les parcelles en semis direct que sur celles en culture conventionnelle tout au long du cycle cultural. La présence de paille limite la germination des mauvaises herbes. La suppression du labour permet d'éviter la remontée des mauvaises graines. L'association avec des plantes de couverture permet d'obtenir des résultats intéressants à court terme sur l'enherbement car elles entrent en compétition avec les mauvaises herbes (Figure 22). Par exemple, la présence d'*Urochloa ruziziensis* associée aux céréales a eu un effet spectaculaire sur l'infestation par *Striga hermontica*, parasite des céréales.

Photo : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira



Figure 22. Le contrôle des mauvaises herbes par la paille de couverture du sol. Sotuba, Mali.

L'augmentation des teneurs en matière organique du sol

La teneur en matière organique du sol (MOS) est le résultat d'un bilan impliquant les apports et les pertes. Les apports représentent la quantité de matière organique qui est restituée au système par les résidus de récolte et des animaux, tandis que les pertes sont liées à la décomposition, aux brûlis et à l'érosion.

L'homme, selon ses choix en matière d'usage et de gestion du sol, peut augmenter ou diminuer le stock de MOS et promouvoir l'amélioration, mais aussi la dégradation de la qualité du sol. Dans le cadre du système conventionnel de gestion, où l'on effectue des opérations de travail intense du sol, les pertes de MOS sont normalement supérieures aux apports, ce qui entraîne un bilan négatif, donc une dégradation du sol. En règle générale, on sait que plus importante est la mobilisation du sol, plus il y aura de rupture des agrégats, ainsi qu'une plus grande disponibilité de l'oxygène pour les micro-organismes, en favorisant la décomposition.

Grâce à l'évolution des systèmes de production, des pratiques conservatrices, telles que le labour minimum et le semis direct, se sont développés. Ces pratiques font que les résidus organiques restent sur la surface du sol, ce qui ralentit le processus de décomposition, c'est à dire favorise l'accumulation de MOS et par conséquent, améliore la capacité de production. La structure du sol non labouré s'améliore, permettant la protection physique de la MOS, à la fois en réduisant la diffusion de l'oxygène à l'intérieur du sol et en servant de barrière physique entre la microflore et le substrat. Le taux de décomposition peut être réduit à moitié en raison de la mise en place du système de semis direct et, en fonction du schéma de rotation de cultures retenu,

on peut optimiser les avantages par un apport plus important de biomasse issue de ce système.

Si l'on compare au système conventionnel de préparation du sol, la teneur en MOS augmente jusqu'à 20 cm de profondeur suite à la mise en place du système de semis direct, y compris sur la première année d'étude (Tableau 1).

Tableau 1. Teneurs en matière organique du sol (MOS) (%) en fonction de la gestion du sol (système de semis direct ou système conventionnel de préparation). Sotuba, Mali, 2011.

Profondeur du sol cm	Système de semis direct	Système conventionnel
	MOS (%)	
0 à 5	0,97	0,75
0 à 10	0,92	0,74
0 à 20	0,80	0,70
20 à 40	0,65	0,63
40 à 60	0,57	0,54
60 à 80	0,49	0,47
80 à 100	0,45	0,42

L'importance de la matière organique du sol

Ce chapitre présente l'intérêt de la matière organique pour la qualité du sol, car il est important de réviser et d'élargir les discussions compte tenu de son rôle essentiel sur la qualité et l'exploitation durable du sol.

En général, la MOS désigne tous les composés qui contiennent du carbone organique dans le sol, y compris les micro-organismes vivants et morts, les résidus végétaux et animaux, partiellement décomposés ou qui ont subi des changements majeurs en fonction de leurs caractéristiques et des conditions climatiques et de sol (température, humidité, oxygène, radiations solaires).

La MOS est une ressource naturelle précieuse, avec des fonctions locales, régionales et mondiales. Les effets de la matière organique sur le sol sont caractérisés par l'amélioration de ses propriétés chimiques, physiques et biologiques. D'autres avantages peuvent être cités : la réduction des sédiments dans les sources d'eau, la filtration des polluants chimiques, la diminution des gaz à effet de serre, mais aussi une stabilisation plus importante de la production agricole et de la sécurité alimentaire.

La MOS est assez sensible aux conditions environnementales et aux changements des pratiques de gestion agricole. Les faibles productivités sont liées à des pertes importantes de MOS, alors que les fortes productivités sont toujours liées aux apports en matière de MOS, relevant d'une gestion appropriée et durable du sol. Les pratiques de gestion inadaptées, telles que le travail intense du sol au lieu du labour minimum ou du semis direct, peuvent entraîner une

perte rapide de la teneur en MOS. Ceci est particulièrement pertinent pour les sols qui ont subi de fortes intempéries, situés dans les régions tropicales de la planète, notamment du continent africain.

La MOS est essentielle pour la productivité des sols agricoles du fait de ses effets directs et indirects sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du sol, mais aussi sur la nutrition des plantes. Compte tenu de la forte interaction avec l'ensemble des caractéristiques du sol, il est difficile d'évaluer l'impact de la MOS selon un seul point de vue. Les avantages les plus importants de la MOS se trouvent sur la Figure 23.

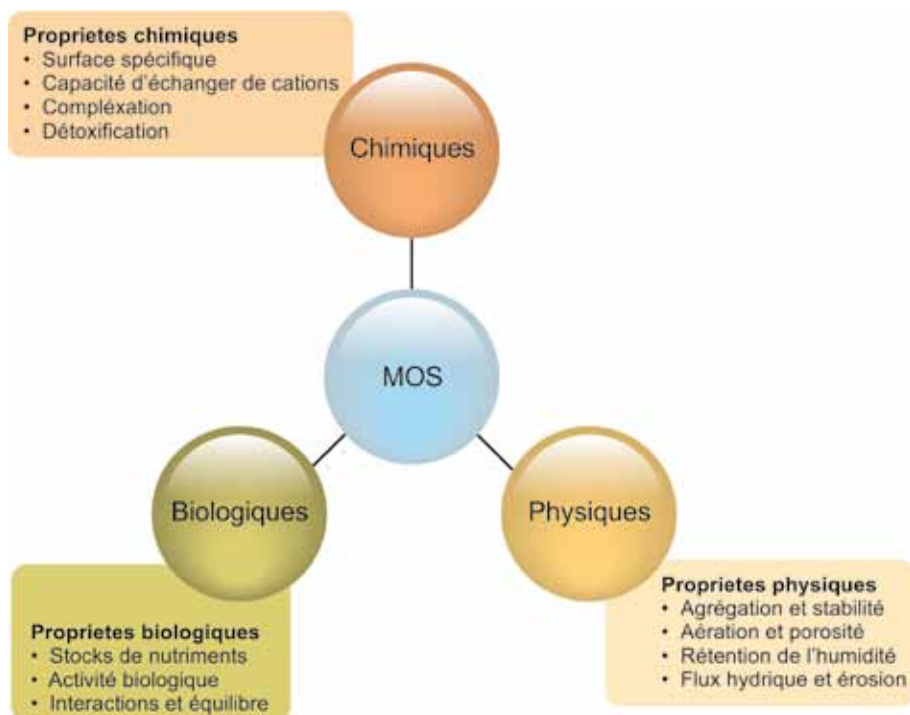


Figure 23. Effet de la MOS sur les propriétés et les fonctions du sol.

Source : adapté de Moreira et Siqueira (2006).

Le rôle de la MOS sur les propriétés chimiques

La MOS améliore la capacité d'échange des cations (CEC) du sol et contribue pour 20% à 90% de la CEC des couches superficielles de sols minéraux et de la plupart de la CEC de sols organiques. La CEC correspond au nombre de charges négatives que le sol possède et qui sont responsables de la rétention des cations (calcium, magnésium, potassium), de l'hydrogène et de l'aluminium. Elle représente la capacité de stockage de cations (des éléments ayant une charge positive). On sait que plus grande est la CEC, moins important est le lessivage des cations. Le problème est que dans des sols tropicaux subissant de fortes intempéries, la fraction d'argile est dominée par kaolin et par des minéraux oxyhydroxydes de Fe et Al dont la CEC est très faible ; dans ces cas, la contribution de la MOS est essentielle car sa CEC est au moins 10 fois plus élevée que celle des minéraux qu'on trouve normalement dans des sols subissant de fortes intempéries. Par conséquent, en fonction du choix des systèmes permettant d'augmenter la MOS, comme c'est le cas du système de semis direct, il est possible d'améliorer de manière très importante la CEC du sol, donc d'augmenter la fixation des cations sur le complexe.

Un autre rôle très important joué par la MOS concerne sa capacité d'effectuer la complexation des cations possédant une activité toxique pour les racines des plantes, comme c'est le cas de l'aluminium, de certains métaux lourds et des pesticides. Ainsi, grâce à la présence de certains groupes fonctionnels, la MOS emprisonne l'aluminium et ne le rend pas disponible pour endommager les racines.

Le rôle de la MOS sur les propriétés physiques

Le phénomène d'agrégation du sol est une conséquence de la réorganisation et de l'action de cimentation des particules primaires

du sol. Le processus d'agrégation du sol est assez complexe et implique une action liée aux facteurs abiotiques (minéralogie) et biotiques (micro-organismes, MOS). On pense que les plus grands agrégats du sol sont formés grâce à la liaison d'agrégats moins importants, et au sein de chaque classe d'agrégats la liaison des particules se fait grâce aux différents agents de cimentation, de manière à ce que la MOS puisse influencer directement et indirectement la formation des agrégats. La MOS, les hyphes fongiques et les racines produisent des agents de liaison qui stabilisent et qui forment de petits agrégats (Figure 24). Le processus d'agrégation est dynamique, tandis que les micro-organismes peuvent agir sur la production d'agents de liaison pour les particules, mais aussi sur la désagrégation des agrégats par la décomposition de la matière organique.

Alors que la matière organique et les micro-organismes stabilisent la structure, une bonne structure protège physiquement la matière organique et les micro-organismes du sol, formant un circuit complexe et un lien étroit entre l'agrégation, la microflore et la matière organique. Toute intervention sur l'une de ces composantes a des conséquences pour l'agrégation. Un sol présentant une bonne agrégation est le meilleur habitat microbien. Il est bien connu que l'agriculture intensive conventionnelle a un impact négatif sur l'état physique du sol ; l'action mécanisée, en plus de briser les agrégats et d'occasionner des impacts sur les micro-organismes, elle accélère la décomposition de la MOS, affectant la densité et l'activité microbienne et la dynamique d'agrégation (formation/dégradation). Les changements des pratiques culturales, le maintien des résidus de récolte sur le sol et la rotation de cultures en association avec des graminées ayant un système racinaire important, peuvent à vrai dire, favoriser l'agrégation et la stabilité des agrégats des sols agricoles (Figure 24), mais aussi pour les conditions de développement, la pro-



Photo : José Geraldo Di Stefano

Figure 24. Détail de la croissance des racines favorisant l'agrégation des particules de sol. Sotuba, Mali.

duction des plantes et la diminution de l'érosion des sols agricoles, en réduisant l'impact de l'agriculture sur l'environnement.

Le contenu et la composition de la MOS jouent un rôle important sur la structure et les propriétés d'adsorption du sol, la rétention d'eau est également modifiée lorsque des changements surviennent à la MOS et aux pratiques de gestion. En général, la MOS peut retenir jusqu'à 20 fois son poids en eau, ce qui est important pour garder l'équilibre biologique du sol et joue un rôle essentiel dans des régions sèches présentant un déficit en eau important (Figure 25).

Photo : Ana Luiza Dias Coelho Borin



Figure 25. Une plus grande tolérance au déficit en eau du sol chez le maïs sous semis direct (à gauche) par rapport au système conventionnel (à droite).

Le rôle de la MOS sur les propriétés biologiques

Le rôle de base de la MOS est celui de promouvoir les processus biologiques du sol servant de substrat pour les macro-organismes et les micro-organismes, de sorte que les composés organiques

peuvent être assimilés, en tant que produits métaboliques libérés ou respirés (CO_2). Ce processus est essentiel pour maintenir le cycle des éléments nutritifs et les maintenir disponibles pour les plantes.

Lors de la décomposition des matières organiques dans le sol, les résidus végétaux subissent une sorte de « traitement biologique » qui consiste à faire que les résidus soient fragmentés par la faune du sol et par les attaques des microorganismes. Les micro-organismes du sol responsables de la décomposition agissent différemment, en fonction de l'état de décomposition des résidus, avec une succession induite par le type de substrat, l'environnement et la vitesse du processus.

Les principaux changements de la MOS peuvent donc être repris comme suit : les résidus sont utilisés par les champignons, les bactéries, les actinomycètes et la microfaune. Ils sont décomposés et minéralisés, sont transformés en CO_2 et biomasse microbienne et ils libèrent des éléments minéraux. Dans des conditions aérobies, la plupart du carbone des résidus est utilisée comme source d'énergie primaire à la croissance microbienne. Ce processus est connu sous le nom de respiration du sol ou respiration édaphique et concerne la disponibilité de nutriments (minéralisation), tout en étant un bon indicateur de la « santé » ou de la qualité du sol.

Les cycles de l'énergie et des nutriments

Si l'on considère l'activité de la microflore comme une roue dont la vitesse de rotation se fait en fonction de l'énergie métabolique disponible, c'est à dire, de la quantité de résidus organiques dans le système, plus on y ajoute de la matière organique, plus vite tourne la « roue microbiologique », consommant davantage de O_2 , libérant des nutriments et du CO_2 et produisant plus d'humus dans le sol. À la

fin du processus, il est estimé que 60% à 70% de carbone ajouté sera respiré (CO_2), de 25% à 30% sera dans la biomasse microbienne et dans les substances organiques non humidifiées, de 5% à 10% sera retenu sur la fraction humique, finalisant donc le cycle du carbone dans le sol.

L'intensité des processus de biotransformation des matières organiques du sol relève de plusieurs facteurs, dont la quantité de résidus apportée au sol, leur qualité/composition, l'activité de la microflore et les conditions environnementales.

La qualité des résidus jouera un rôle important sur la disponibilité des éléments nutritifs par la différence nette entre la minéralisation (éléments nutritifs disponibles) et l'immobilisation (nutriments stockés ou non disponibles). Les matériaux en minéralisation peuvent être classés comme riches, pauvres et intermédiaires, et cela va déterminer le sens du processus, c'est à dire, si l'on libère et si l'on immobilise les nutriments du sol. Les substrats riches sont ceux qui ont suffisamment de nutriments pour répondre à la demande des micro-organismes, et sont facilement minéralisés, contrairement à ceux qui sont classés comme pauvres du fait d'avoir peu de nutriments et qui provoquent l'immobilisation, c'est à dire, il y a souvent une forte concurrence entre la culture et les micro-organismes pour les éléments nutritifs, en particulier pour l'azote.

On peut considérer que l'azote est le nutriment pouvant catalyser ou accélérer le processus de décomposition de la matière organique. Un exemple pratique et facile à comprendre concernant cette relation peut être la comparaison entre la décomposition des pailles de légumineuses (riches en azote) et celle des pailles de graminées (ayant une faible teneur en azote). Les pailles de légumineuses sont décomposées facilement et fournissent des éléments nutritifs pour

la culture suivante ; les pailles de graminées sont décomposées lentement, ce qui fait que la culture suivante a besoin d'une fertilisation plus importante pour compenser l'immobilisation des nutriments. En revanche, il faut reconnaître que la lente décomposition favorise la protection des sols.

Pour éviter des problèmes de déficit en azote chez les cultures, on doit y procéder de la manière suivante :

- Ajouter des fertilisants azotés en association avec les résidus sur des sols destinés au semis direct.
- Garder les résidus de récolte sur la surface du sol, comme c'est le cas du système de semis direct. Cela réduit leur décomposition d'environ 50%, et représente une stratégie importante pour le succès de ce système dans les régions tropicales où la matière organique est décomposée très facilement sur le sol.
- Insérer des légumineuses dans les systèmes de rotation de cultures et en association avec les graminées, car c'est une façon d'accroître l'apport d'azote gratuitement.
- Effectuer le compostage du matériel avant son application sur le sol.

Une autre composante jouant un rôle important sur la décomposition est l'environnement. Dans des conditions d'anoxie ou manque d'oxygène, l'activité microbienne est changée et la décomposition devient très lente. Au contraire, toute intervention visant à améliorer l'aération du sol entraîne une accélération de la décomposition. Les facteurs climatiques tels que le régime thermique et pluvial, jouent un rôle essentiel sur la quantité et le type de résidus existants, mais aussi sur leur taux de décomposition, la température

étant donc l'un des facteurs essentiels puisque la vitesse de décomposition double lorsque la température est élevée de 10 °C, dans la fourchette de 5 °C à 35 °C. La décomposition sous les tropiques se fait très facilement et la mobilisation du sol occasionne normalement des pertes importantes en matière de stock de carbone. Les systèmes de labour minimum et le semis direct entraînent une réduction de la décomposition de la matière organique, mais aussi une augmentation de ses teneurs, donc une amélioration des conditions du sol. En plus, les systèmes de production agricole doivent être mis en place de manière à profiter de tous les résidus organiques disponibles sur le terrain. Plus la MOS est dérisoire, plus importante est l'utilisation des fertilisants minéraux.

Enfin, il est important de réfléchir sur le rôle du sol comme compartiment destiné à soutenir la vie végétale, animale et par conséquent la vie humaine. La croissance de la population et la quête de davantage de qualité de vie pressent la base des ressources naturelles. Assurer l'accès à ces ressources ainsi que leur utilisation durable pour le bien-être de l'homme constitue un défi à relever.

La gestion de la fertilité du sol en semis direct

La demande en matière de nutriments par les plantes du système

Lorsqu'on travaille dans un système de production, il faut faire attention à la demande en nutriments et au recyclage des cultures faisant partie du système. Il faut donc connaître la demande en matière de nutriments nécessaire pour produire, mais aussi la partie des nutriments devant rester sur les résidus de récolte.

Les plantes ont besoin d'éléments nutritifs pour assurer leur développement végétatif et reproductif. Ces nutriments sont classés comme des macronutriments (azote – N, phosphore – P, potassium – K, calcium – Ca, magnésium – Mg et soufre – S, qui sont absorbés dans divers kg ha^{-1}) et comme des micronutriments (bore – B, chlore – Cl, cuivre – Cu, fer – Fe, manganèse – Mn, nickel – Ni et zinc – Zn, qui sont absorbés en quelques grammes ou kg ha^{-1}). À ceux-ci s'ajoutent les nutriments organiques que les plantes absorbent de l'air et de l'eau (carbone – C, oxygène – O et hydrogène – H), qui forment la plupart de la matière sèche accumulée par les végétaux.

Ainsi, on n'obtient une productivité élevée sur le champ que lorsqu'on combine des matériels génétiques à fort potentiel de production, les sols fertiles ou correctement fertilisés avec des conditions environnementales appropriées, en particulier humidité, température et luminosité.

Les nutriments sont nécessaires pour former les feuilles, les tiges, les racines, les fleurs, les fruits, les graines et les fibres. Au départ, les feuilles constituent le principal dépôt de ces nutriments, suivies des tiges et des racines. Au cours du cycle de la culture, les nutriments, notamment ceux qui sont mobiles (N, P, K et Mg), sont transportés et redistribués des autres parties de la plante vers les capsules. En ce qui concerne le cotonnier, la plupart du potassium transporté vers le fruit se trouve dans la capsule ; la graine rassemble la plupart des autres nutriments transportés, alors que très peu se trouve dans la fibre, car celle-ci a environ 99% de carbohydrates, en particulier de la cellulose.

Ainsi, pour chaque tonne de coton graine produite, en moyenne, on a besoin de 69 kg ha⁻¹, 25 kg ha⁻¹, 73 kg ha⁻¹, 36 kg ha⁻¹, 26 kg ha⁻¹ et 5 kg ha⁻¹ de N, P (P₂O₅), K (K₂O), Ca (CaO), Mg (MgO) et S (Figure 26). De ces quantités extraites, seule une partie est exportée vers la récolte, en particulier dans les graines du coton récolté. Par conséquent, il faut garder les résidus de récolte sur les champs et prendre des mesures pour favoriser leur décomposition, car cela pourra faciliter le recyclage des éléments nutritifs à la culture suivante à mettre en place sur la même parcelle.

Pour produire trois tonnes de coton graine par hectare, productivité qu'on retrouve souvent dans des zones expérimentales de coton au Bénin, au Burkina Faso, au Tchad et au Mali, il faut absorber 208 kg, 77 kg, 220 kg, 109 kg, 80 kg et 17 kg de N, P, K, Ca, Mg et S, respectivement. Si le sol n'a pas ces quantités de nutriments, la productivité attendue ne sera pas obtenue. En général, il est nécessaire de compléter la fertilité du sol avec l'utilisation d'engrais minéraux et/ou organiques afin de compenser le déficit en nutriments et donc assurer la productivité attendue.

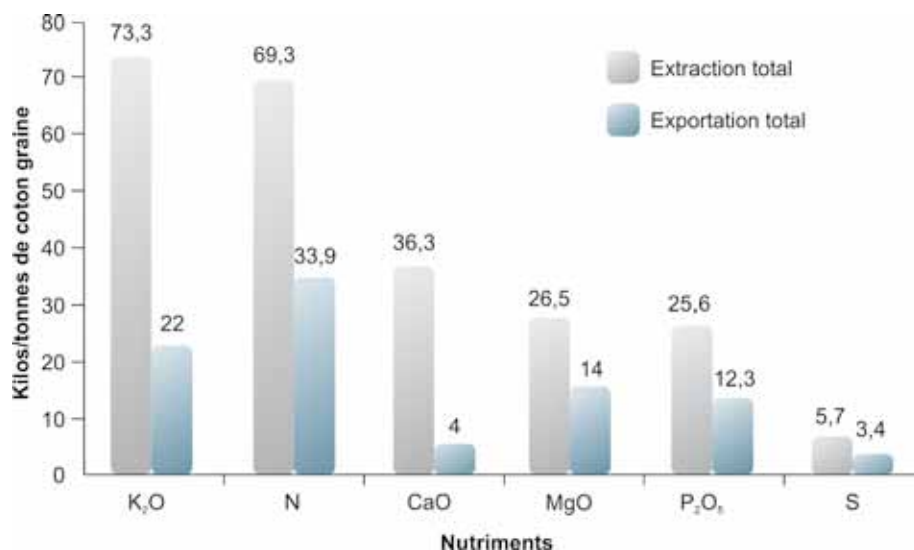


Figure 26. Extraction et exportation totale de nutriments par le cotonnier.

Source : adapté de Carvalho et al. (2011).

Pour ce qui est de la culture du maïs, on peut vérifier dans le Tableau 2 que la demande de nutriments et leur exportation augmentent également avec l'accroissement de la productivité. Mais elle augmente énormément si l'on considère le prélèvement des résidus de maïs, soit par les brûlis ou pour faire de l'ensilage (alimentation du bétail pendant la saison sèche).

Cette paille doit plutôt rester sur le sol où elle va permettre de diminuer l'évaporation de l'eau, de réduire la température de la surface, de protéger la macrofaune, la mésofaune et la microfaune et en particulier de réduire l'érosion du sol.

Pour nourrir de manière appropriée le maïs, il faut que l'agriculteur prenne en compte la productivité, tant celle qu'il espère avoir dans sa culture que celle de sa région, mais aussi qu'il fasse attention aux besoins de la plante. Pour une productivité de 10 t ha⁻¹ de maïs,

Tableau 2. L'extraction moyenne de nutriments par la culture du maïs destinée à la production de graines et à l'ensilage, selon les différents taux de productivité.

Type d'exploitation	Productivité t ha ⁻¹	Nutriments extraits ⁽¹⁾				
		N	P	K	Ca	Mg
		kg ha ⁻¹				
Graines	3,65	77	9	83	10	10
	5,80	100	19	95	7	17
	7,87	167	33	113	27	25
	9,17	187	34	143	30	28
	10,15	217	42	157	32	33
Ensilage (matière sèche)	11,60	115	15	69	35	26
	15,31	181	21	213	41	28
	17,13	230	23	271	52	31
	18,65	231	26	259	58	32

⁽¹⁾ Pour convertir P en P₂O₅, K en K₂O, Ca en CaO et Mg en MgO, multiplier par 2,29, 1,20, 1,39 et 1,66, respectivement.

Source : Coelho et al. (2012).

il pourra y avoir une extraction maximale de 217 kg ha⁻¹, 42 kg ha⁻¹, 157 kg ha⁻¹, 32 kg ha⁻¹ et 33 kg ha⁻¹ de N, P, K, Ca et Mg, respectivement (Tableau 2). Cette demande est bien plus importante si l'on enlève la partie aérienne pour faire de l'ensilage.

La culture du mil entraîne également l'exportation de quantités importantes de nutriments du sol (Tableau 3). En moyenne, une production de 8,8 t ha⁻¹ de matière sèche de mil peut recycler 167 kg ha⁻¹, 18 kg ha⁻¹, 231 kg ha⁻¹, 42 kg ha⁻¹, 23 kg ha⁻¹ et 7 kg ha⁻¹ de N, P, K, Ca, Mg et S, respectivement. C'est une plante de couverture très importante pour le semis direct car elle fournit de grandes quantités de paille et permet de recycler fortement les nutriments, en particulier le potassium. Si l'on en utilise pour produire des graines ou de la paille pour le bétail, il faut faire attention à l'épuisement du sol au cours des

années de culture. Dans ces cas, une fertilisation spécifique à l'égard de la culture est demandée, afin d'éviter la baisse de productivité.

L'association de plantes aide à recycler les nutriments dans le système et à l'enrichir, notamment en azote. L'utilisation du mil (*Pennisetum glaucum*) procure un recyclage plus important des

Tableau 3. La production et l'extraction de macronutriments dans la matière sèche (MS) de plants de mil.

Variété	Étape ⁽¹⁾	MS t ha ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	S
			kg ha ⁻¹					
ADR 300	Pré-épaississement (36 JAS) au printemps	3,5	88	8	246	23	11	0,4
NPM3-ALT	Épaississement	4,4	72	11	143	21	12	
NPM1-ALT	Épaississement	6,0	99	15	160	26	18	
BN2	62 JAS	6,3	64	14	171	24	18	5,0
9317464	Épaississement	7,7	127	17	205	34	22	
CMS 01	Épaississement	8,5	139	19	195	37	24	
ADR 300	Début de la floraison (50 JAS) au printemps	8,8	205	25	448	59	29	1,3
CMS 03	Épaississement	9,3	153	18	231	36	28	
BN2	Floraison pleine	10,3	166	23		41	23	13,0
Hybride ADR7010	Début de la floraison (50 JAS) au printemps	14,1	351	173				
ADR500	Début de la floraison (50 JAS) au printemps	15,4	331		180			

⁽¹⁾ JAS = jours après le semis.

Source : adapté de Santos et al. (2012).

nutriments dans les systèmes par rapport à l'usage de la crotalaire (*Crotalaria juncea*), grâce à une accumulation plus importante de matière sèche que le mil entraîne. Comme le montre le Tableau 4, les deux variétés présentent une absorption et une accumulation très importantes, et peuvent être utilisées toutes seules ou en association en vue d'un recyclage plus important des nutriments au sein du système de production. Cependant, lorsque la crotalaire enrichit le sol en azote par la fixation biologique avec des bactéries fixatrices d'azote, le mil n'absorbe que les formes disponibles de N dans le profil de sol. Dans les deux cas, si la fertilité du sol ou sa fertilisation précédente sont plus élevées, plus importante est la quantité de nutriments en cycle, disponibles pour la culture suivante.

Le Tableau 4 montre qu'une culture précédente avec des plantes de couverture peut enrichir la partie supérieure du sol en nutriments, surtout si le sol a une fertilité moyenne à forte. Les sols à faible fertilité présentent également des suppléments de nutriments sur la surface grâce à l'usage de ces plantes, mais la quantité recyclée

Tableau 4. Matière sèche (MS), relation C/N, teneurs et quantités accumulées de macronutriments dans la partie aérienne des plantes de couverture. Moyennes de huit répétitions.

Traitement	MS kg ha ⁻¹	Relation C/N	N	P	K	Ca	Mg	S
			Teneur (g kg ⁻¹)					
Crotalaire	8.111b	35,4b	22,9a	2,3a	13,00c	8,9a	2,4b	1,7b
Mil	14.040a	42,4a	18,3b	2,7a	22,90a	4,0c	3,4a	2,5a
Crotalaire + Mil	8.470b	42,1a	19,0b	2,5a	16,06b	5,4b	2,6b	1,9b
Quantité accumulée (kg ha ⁻¹)								
Crotalaire			184,4b	18,7b	107,3b	71,1a	19,7b	13,8b
Mil			257,3a	38,5a	321,5a	47,4ab	47,4a	35,0a
Crotalaire + Mil			161,0b	21,6b	136,1b	45,8b	22,3b	16,5b

Source : Silva et al. (2010).

est beaucoup plus faible. Ainsi, le producteur doit être conscient des conditions initiales de la fertilité de son sol avant la première culture ; il doit également le fertiliser avec des engrais minéraux ou organiques lors de chaque culture afin d'éviter les symptômes de déficits se produisant dans les différentes saisons du schéma de rotation de cultures faisant partie du système de semis direct.

Les symptômes des déficiences en nutriments

Les principaux symptômes de carences en minéraux sont similaires entre les différentes espèces et variétés de plantes habituellement cultivées. C'est parce que les éléments jouent les mêmes rôles dans différentes plantes, et affectent les mêmes organes et entraînent les mêmes réactions métaboliques dans chacune de ces espèces et variétés. Malgré cela, quelques petites variations peuvent s'y produire.

En général, l'identification des carences en minéraux peut se faire par le diagnostic foliaire et l'analyse foliaire. Lors de l'analyse foliaire, on procède à des analyses chimiques des feuilles et on peut les comparer à des valeurs de référence établies sous forme de tableaux permettant de savoir si le tissu présente des carences en minéraux ou pas. Pour ce qui est du diagnostic foliaire, on observe sur le terrain s'il y a des symptômes typiques d'une carence ou d'un excès d'un nutriment particulier, afin de vérifier si le symptôme se trouve :

- Très répandu, c'est à dire, s'il survient dans l'ensemble de la parcelle ou dans des portions.
- Symétrique dans la plante, c'est à dire, s'il survient à des feuilles se trouvant dans des positions opposées sur la plante, à la même hauteur d'insertion sur la tige et près de la tige.

- Sous la forme de gradient, c'est à dire, l'intensité du symptôme augmente du bas vers le haut ou du haut vers le bas.

Les symptômes de carences en nutriments se produisent toujours largement, de façon généralisée, ou dans des parcelles importantes de la culture. Ces taches peuvent être associées à différents types de sols du même champ ou à des conditions différentes de développement des racines (par exemple, zones inondées, zones ayant des sols compactés, tache due à un sol sableux). Les symptômes se produisant sur de petites parcelles ou sur des plantes isolées peuvent être associés à une attaque de ravageurs, à des maladies, à des dégâts occasionnés par l'action mécanisée ou pour des raisons physiologiques. Les symptômes présentent des symétries car au fur et à mesure que le nutriment se déplace sur une hauteur particulière de la tige, il est censé atteindre les feuilles se trouvant sur la même position sur la tige.

Les symptômes de carence en nutriments présentent également un gradient d'intensité faisant qu'ils augmentent du bas vers le haut (N, P, K, Mg, Mo) ou du haut vers le bas (Ca, S, B, Cu, Fe, Mn et Zn). À titre d'exemple, le manque d'azote provoque le jaunissement des feuilles du cotonnier, qui progresse vers le jaunissement intégral des feuilles fournissant des fibres textiles, la mort et la chute de ces feuilles, mais aussi vers des symptômes atteignant la partie supérieure de la plante ; le manque de soufre provoque une chlorose typique du haut vers le bas, faisant que les feuilles des pointes deviennent vertes, qui se poursuit vers le bas jusqu'au jaunissement intégral des feuilles, et par conséquent leur mort.

La Figure 27 nous aide à identifier les symptômes liés aux carences en nutriments des autres symptômes également importants. Il faut faire attention à ne pas les confondre car de différentes

taches foliaires peuvent se produire sur les feuilles du cotonnier et sur les autres cultures par des agents différents, tels que climatiques, chimiques, physiques ou mécaniques.

Les symptômes visuels des carences en nutriments chez le cotonnier se présentent dans la Figure 28.

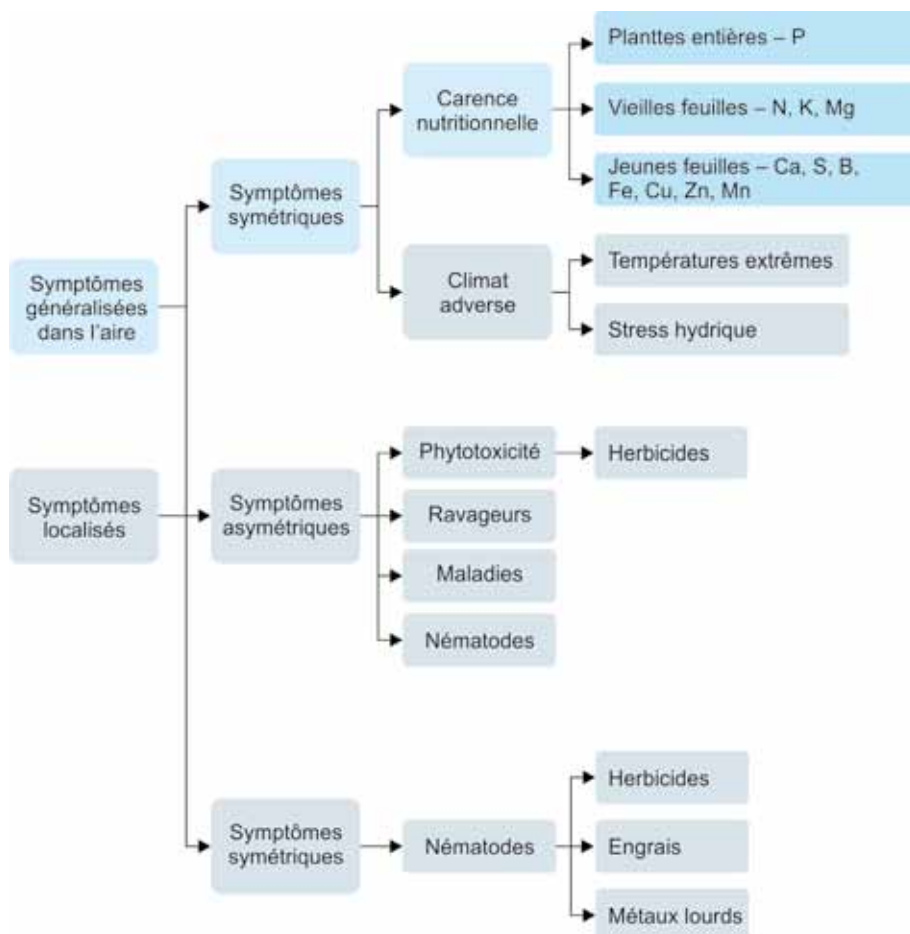


Figure 27. Les caractéristiques en vue du diagnostic visuel des carences en nutriments chez le cotonnier.

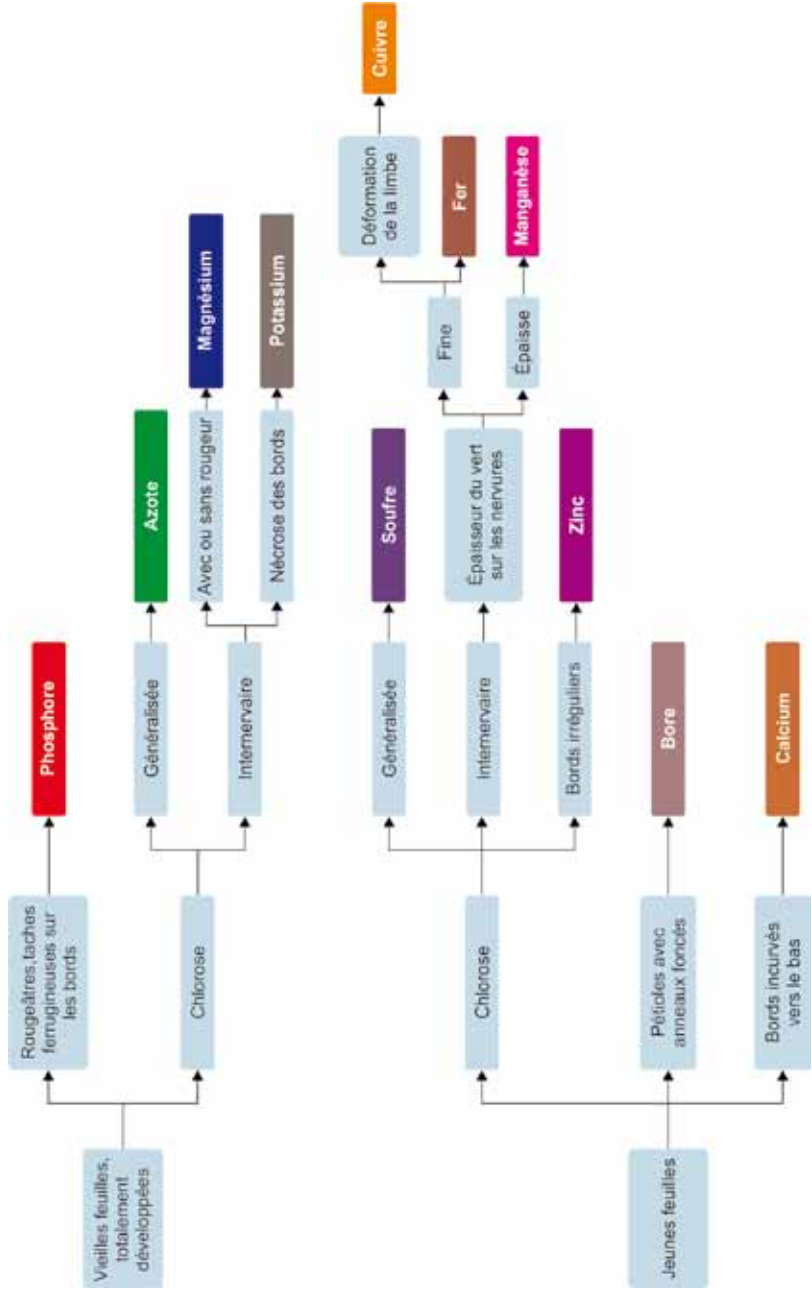


Figure 28. Les caractéristiques pour le diagnostic visuel des carences en nutriments chez le cotonnier.

Les symptômes des carences en nutriments chez le cotonnier sont les suivants :

- En azote : au début de la croissance de la plante (carence très forte) on vérifie : diminution de la croissance ; chlorose ; jaunissement et chute des feuilles ; chute brutale des bourgeons, des fleurs et des fruits ; et anticipation du cycle, avec ouverture prématurée des fruits. Si la carence se produit après le début de l'émission des boutons floraux (carence chronique), il y a jaunissement faible de la plante ; réduction de la croissance ; chlorose sur les feuilles plus âgées (Figure 29) ; perte prématurée des feuilles ; chute des bourgeons, des fleurs et des fruits ; anticipation du cycle ; et production de fibres immatures, petites, épaisses et présentant une très faible résistance. Les conditions favorisant à l'apparition des symptômes : des sols acides, sableux, présentant de faibles teneurs en matière organique, mais aussi une très forte pluviosité.
- En phosphore : au début de la croissance (carence très forte), il y a une réduction de la croissance, les plantes deviennent naines, les feuilles deviennent vert-foncé brillant ; chlorose et nécrose marginale des feuilles ; chute des feuilles ; avortement de la floraison ; très peu de production ou production nulle (Figure 30). Si la carence est faible ou chronique, il y a une croissance peu importante de la plante, un nombre moins important de capsules par plante, ces capsules présentant un poids moyen inférieur ; les fibres sont courtes et présentent très peu de résistance.
- En potassium : la carence très forte provoque une réduction de la croissance, chlorose très forte, marginale et entre les nervures des feuilles (Figure 31), nécrose et chute de la

Photos : Ana Luiza Dias Coelho Borin



Figure 29. Le manque d'azote : vue partielle de la surface sans azote aux côtés de plants fertilisés normalement (A) et chlorose des feuilles sur une plante présentant une carence en azote (B).

Photos : Gilvan Barbosa Ferreira



Figure 30. Carence en phosphore : des plantes naines par rapport à celles normales de la zone fertilisée (A) et couleur verte-foncée, bronzage, nécrose et chute de la feuille (B).

feuille, mais aussi perte prématurée des feuilles de la plante ; il y a également réduction de la taille, avortement ou réduction importante de la floraison et production de petites capsules dont les fibres présentent une faible qualité ; forte baisse de productivité et anticipation de la fin du cycle de la culture, croissance moins importante, nombre de fruits moins important, poids moyen des capsules inférieur et productivité moins importante.



Photos : Gilvan Barbosa Ferreira

Figure 31. Évolution du bas vers le haut de la chlorose entre les nervures des feuilles de cotonniers déficients en potassium.

- En calcium : la carence en calcium n'est pas fréquente dans les champs. L'acidité du sol occasionne des symptômes similaires. Dans des conditions contrôlées, il survient la mort du bourgeon apical et celle de la plante.
- En magnésium : la carence très forte réduit la croissance, occasionne une chlorose marginale entre les nervures des feuilles, qui fait que les feuilles prennent tout de suite une couleur rougeâtre (Figure 32). Il y a également un nombre moins important de capsules et une productivité plus faible.

Photos : Gilvan Barbosa Ferreira



Figure 32. Le manque de magnésium – chlorose sur les feuilles et couleur rougeâtre.

- En soufre : le manque de soufre se traduit par une chlorose vert-citron sur les feuilles des pointes ayant tendance à se développer vers le bas de la plante, (Figure 33).

Photo : Gilvan Barbosa Ferreira



Figure 33. Feuilles vert-citron chez un cotonnier présentant un manque de soufre.

- En bore : le symptôme se manifeste sur les feuilles du sommet où l'on voit apparaître des anneaux chlorotiques sur les pétioles des feuilles jeunes (Figure 34), qui deviennent ridées et dures.



Photos : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

Figure 34. Des anneaux chlorotiques sur les pétioles des feuilles jeunes de cotonnier présentant un manque de bore.

- En cuivre, en fer et en nickel : les symptômes de déficience de ces éléments n'ont pas été observés sur le terrain.
- En manganèse : chlorose entre les nervures des feuilles jeunes, en particulier sur des sols à pH élevé ou des sols sableux, et avec très peu de matière organique.
- En zinc : chlorose entre les nervures des feuilles jeunes, mais aussi revirement vers le haut des bords des feuilles.

L'évaluation de la fertilité du sol

L'évaluation de la fertilité du sol comprend des étapes d'échantillonnage, d'analyse chimique et d'interprétation des résultats.

L'évaluation de la fertilité du sol concerne :

- La collecte et la préparation des échantillons de sol pour analyse chimique.
- La collecte et la préparation des échantillons des tissus végétaux pour analyse chimique.
- Des méthodes d'analyse.
- L'interprétation des résultats.
- La recommandation en matière de corrections et de fertilisants.

En matière d'évaluation de la fertilité, il est important de réviser des concepts de base :

- La fertilité du sol : c'est l'aptitude du sol à fournir des nutriments aux plantes. Elle est caractérisée par les teneurs en nutriments disponibles (azote – N, phosphore – P, potassium – K, calcium – Ca, magnésium – Mg, soufre – S, bore – B, chlore – Cl, cuivre – Cu, fer – Fe, manganèse – Mn, molybdène – Mo, nickel – Ni et zinc – Zn), en acidité active (hydrogène – H), échangeable (aluminium – Al) et potentielle (H+Al), en plus de la matière organique. Les teneurs en nutriments disponibles sont mesurées au moyen des extracteurs chimiques simulant l'extraction de nutriments par les racines des plantes.
- La disponibilité des nutriments : c'est la portion de la teneur totale en nutriments que le sol met à disposition des plantes au long de leur cycle de production.
- La teneur disponible : c'est la teneur récupérée du sol par un extracteur chimique qui reflète la quantité de nutriments

qui est absorbée et accumulée par la plante dans des conditions contrôlées de culture.

- Le nutriment échangeable : c'est le nutriment présent sur la surface des particules du sol qui est facilement échangeable pour un autre ion à charge égale.
- L'acidité active : c'est l'acidité présente dans la solution du sol qui se trouve immédiatement en contact avec les racines des plantes. Elle est mesurée par le potentiel hydrogène (pH) qui détermine la concentration d'ions H^+ présents dans la solution du sol (Figure 35).
- L'acidité échangeable (Al^{3+}) : c'est l'acidité produite par la dissolution d'aluminium absorbé de manière échangeable par les particules du sol.



Photo : Ana Luíza Dias Coelho Borim

Figure 35. Mesure du potentiel hydrogène (pH) du sol.

- La capacité d'échange de cations (CEC) : c'est la capacité potentielle de stockage des éléments nutritifs cationiques (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) sous la forme échangeable que le sol présente lorsque son pH est élevé par rapport aux conditions naturelles jusqu'à un pH de 7,0.
- La matière organique : la matière organique du sol (MOS) est constituée de composés organiques à stabilité variée (surtout l'humus, l'acide humique et l'acide fulvique), de particules organiques présentant différents niveaux de minéralisation, de résidus de plantes, d'animaux et de micro-organismes. S'agissant de la partie la plus dynamique du sol, elle est responsable de 56% à 82% de la CEC des sols des régions tropicales (SILVA ; MENDONÇA, 2007). La MOS est la source principale de N, S et B, en plus d'être le réservoir temporaire de la plupart des éléments essentiels.
- La saturation des bases (ou V) : c'est le rapport en pourcentage entre la somme des bases échangeables ($SB = K^+$, Ca^{2+} et Mg^{2+}) et la CEC à pH 7,0.
- L'assainissement du sol : concerne la correction de l'ensemble ou de la plupart des propriétés liées à la fertilité du sol. Dans ce cas, on procède à la correction de l'acidité du sol et à la correction des teneurs en phosphore et en potassium, qui est normalement appelée de fertilisation corrective.
- Le chaulage : c'est la neutralisation de l'ensemble de l'acidité échangeable et des parties de l'acidité active et potentielle jusqu'à un niveau de pH favorable à la croissance intégrale et à la production de la culture envisagée. Cette correction est effectuée avec de la chaux (roche calcaire moulue contenant du calcium et du magnésium) lorsqu'on souhaite corriger la

couche allant de 0 cm à 20 cm ou éventuellement jusqu'à 30 cm de profondeur.

- La fertilisation avec le gypse : afin d'éliminer les effets de l'aluminium toxique en profondeur, on utilise du gypse (excédent de la fabrication du superphosphate triple) ou minéral (du gypse contenant du sulfate de calcium bi-hydraté). Alors que les teneurs en Al^{3+} sont faibles, celles en calcium et en soufre sont élevées sur la surface du sol.
- La fertilisation avec du phosphate : concerne l'application de source de phosphore (P) sous la forme de poudre, en superficie totale et en pré-semis, visant à augmenter les teneurs en P total du sol, afin de permettre de mettre à disposition du P qui sera appliqué au moyen de fertilisation.
- La fertilisation en potassium : c'est l'application de potassium en superficie totale ayant pour objectif d'augmenter la teneur en potassium (K) des sols pauvres en K. Cette pratique n'est pas recommandée s'il s'agit de sols sableux car elle présente des risques de lessivage du potassium.
- La fertilisation : il s'agit de l'application de fertilisants minéraux ou organiques sur le sol visant à lui fournir les quantités appropriées et équilibrées de nutriments en conformité avec les besoins des plantes. Elle se fait en deux temps :
 - a) Lors du semis, dénommée fertilisation de base.
 - b) Lors de la croissance des plantes, dans le cadre des fertilisations dénommées fertilisations de couverture, de croissance et de production.

La quantité de nutriments est définie au moyen de l'analyse du sol et de données issues des essais de calibrage de nutriments. En

ce qui concerne les informations complémentaires, elles se font par l'accès à des informations sur l'historique de la parcelle, le rapport économique entre coût des intrants et coût du produit, mais aussi par le niveau technique du producteur.

L'échantillonnage de sol

La fertilité du sol est liée à la croissance et au développement des plantes. Son évaluation a pour but de quantifier l'aptitude du sol à procurer les nutriments pour le développement intégral des cultures, cela étant essentiel pour orienter la gestion appropriée des sols susceptibles d'entraîner une productivité économique et une durabilité environnementale pour l'exploitation agricole.

La collecte d'échantillons est la première étape dont dépendront toutes les autres étapes du processus d'évaluation concernant la fertilité des sols. En raison de la grande variabilité spatiale qui se produit dans les sols, il faut mettre en place des pratiques judicieuses d'échantillonnage afin d'en obtenir une identification précise.

Plus grande est la variation retrouvée sur une zone à analyser, plus important doit être le nombre d'échantillons nécessaires pour la caractériser.

Des erreurs d'échantillonnage découlent du nombre insuffisant d'échantillons ou d'échantillonnage erroné ; les erreurs de détermination ou les erreurs d'analyse découlent quant à elles de la méthode de mesure et peuvent être occasionnées par des équipements présentant des problèmes ou par erreur des agents effectuant les analyses. En général, des erreurs d'analyse sont moins importantes que celles d'échantillonnage, car les laboratoires performants présentent des erreurs d'analyse inférieures à 5%.

Le prélèvement des échantillons qui sont vraiment représentatifs du sol est essentiel car les échantillons qui n'en sont pas représentatifs, même s'agissant d'un laboratoire d'excellence, ne permettent pas d'approcher la moyenne réelle des caractéristiques analysées.

Il faut comprendre que lors de l'échantillonnage à peu près 200 g de sol sont collectés sur le terrain et transportés au laboratoire où environ 10 cm³ sont utilisés pour les analyses chimiques. Cela représente une quantité tout à fait infime du volume de sol contenu dans un hectare et à une profondeur de 0 cm à 20 cm.

Le sol est naturellement hétérogène, avec une très importante variabilité verticale et horizontale découlant de processus de pédogénèse, de la minéralisation, de la végétation, de la topographie et de l'activité humaine. L'hétérogénéité horizontale est observée dans le paysage grâce aux différences qu'on retrouve chez la végétation, la texture, la couleur, le drainage et le type d'usage. L'hétérogénéité verticale quant à elle est liée à la préparation du sol, à l'application localisée de fertilisants ou à la formation de résidus organiques, à la mécanisation et aux tendances de croissance des racines.

En général, il faut collecter de 15 à 20 échantillons simples, les mélanger afin de former un échantillon composé à transporter au laboratoire ; on utilise le résultat des analyses pour caractériser une zone homogène. Une zone homogène est une zone présentant des caractéristiques semblables telles que même inclinaison, texture, couleur, gestion actuelle et gestion précédente. Sa taille peut être plus ou moins d'un hectare ou des dizaines d'hectares.

Il faut que chaque échantillon simple ait le même volume, la même profondeur et la même largeur de prélèvement, afin que son mélange représente une moyenne de caractéristiques fiables.

La procédure d'échantillonnage de sol

- Diviser la zone en parcelles ou en parcelles homogènes : cette division est essentielle pour les variations visibles, en matière de topographie, de couverture végétale naturelle, d'usage agricole, de texture et de couleur du sol, mais aussi de drainage et d'historique de gestion et de productivité. Si la zone homogène est trop vaste, elle pourra être subdivisée en plusieurs parcelles allant jusqu'à 10 hectares.
- Les lieux de collecte des échantillons : les points de prélèvements doivent être cités en zigzag dans la parcelle, en évitant les points où se trouvent les colonies de fourmis ou des termites, mais aussi les endroits où se trouvent les brûlis et les excréments d'animaux. Il faut enlever la couche superficielle de résidus végétaux couvrant le sol pour ensuite procéder à l'échantillonnage (Figure 36).
- Le nombre d'échantillons simples : sur la base de l'équation pour déterminer le nombre d'échantillons simples et du coefficient de variation concernant les principaux attributs analysés, il faut collecter entre 10 et 20 ou entre 20 et 40 échantillons simples. Ne jamais collecter moins de 10 échantillons, et augmenter le nombre d'échantillons simples si une variabilité plus importante est observée. En général, la variabilité augmente avec l'intensification de l'activité agricole, en raison de l'application de chaux et d'engrais (mélangés ou non, sous forme localisée ou non) et de la décomposition des résidus organiques localisés. S'il s'agit du système de semis direct, cette situation est grave car le sol n'est pas homogénéisé au moyen de labour et de hersage, et peut être encore plus grave s'il s'agit de sols argileux et en pente.



Photo : Ana Luiza Dias Coelho Borin

Figure 36. Nettoyage de la surface du sol avant l'échantillonnage.

- Les outils : différents types d'outils peuvent être utilisés, dont : tarière, tarière à vis, tarière néerlandaise et houe de bêchage ou bêche droite (Figure 37). Le bon outil doit avoir les caractéristiques suivantes : permettre de prélever une petite quantité et le même volume de sol, être facile à nettoyer, rendre possible le prélèvement dans de différents types de sol, être constitué d'une matière solide et durable, être facile à utiliser et entraîner un prélèvement rapide des échantillons. Les échantillons prélevés doivent être emballés dans des contenants propres, ces contenants ne devant surtout pas être en métal, en particulier galvanisé, afin de ne pas contaminer le sol prélevé.

Photos : Ana Luiza Dias Coelho Borin



Figure 37. Des outils et des équipements manuels utilisés pour l'échantillonnage de sol.

- La profondeur de l'échantillonnage : pour le cotonnier, les autres cultures annuelles et le pâturage à mettre en place, il faut prélever des échantillons de sol dans des profondeurs de 0 cm à 20 cm et de 20 cm à 40 cm (Figure 38).
- Le système conventionnel de préparation du sol : les échantillons peuvent être prélevés sur toute la superficie car le sol a été déjà homogénéisé par sa préparation.
- Le système de semis direct : prélever des échantillons de manière perpendiculaire à la direction de la ligne, sur la bande correspondante à la largeur de l'interligne de la culture mise en place lors de la dernière année agricole (Figure 39) : prélever environ 3 échantillons simples de chaque interligne aux profondeurs de 0 cm à 5 cm (prélever des échantillons simples pour en faire un échantillon composite) et de 5 cm à 10 cm (prélever des échantillons simples pour en faire un échantillon composite), mais aussi séparer chaque profondeur pour les analyser séparément.



Photo : Ana Luiza Dias Coelho Borin

Figure 38. Définition de la profondeur d'échantillonnage de sol.



Photo : Alexandre Cunha de Barcellos Ferreira

Figure 39. Des points d'échantillonnage de sol se trouvant entre les lignes de semis, dans le cadre du système de semis direct.

- Le stockage, l'identification et l'envoi des échantillons : après chaque prélèvement, les échantillons doivent être séchés à l'air, à l'ombre, avant d'être envoyés au laboratoire pour analyse. Si le laboratoire se trouve à proximité, ils peuvent être envoyés immédiatement après le prélèvement, pour y être séchés. Dans tous les cas, chaque échantillon doit être identifié avec le nom du propriétaire, son adresse, le nom de la propriété, le nom de la parcelle, la profondeur, la culture utilisée pour la saison précédente et pour celle actuelle, la municipalité ou la région d'origine, mais aussi avec des informations concernant l'utilisation de fertilisants et les corrections ayant lieu auparavant.

L'interprétation des résultats des analyses de sol

Chaque région adopte un ensemble de réactifs pour les analyses d'échantillons, et il est important de connaître les réactifs utilisés. Il est également important qu'il y ait sur la région des données expérimentales susceptibles de corrélérer les résultats des analyses de sol avec la productivité des cultures. En général, on met également en place des tableaux affichant les normes d'interprétation des résultats des analyses et classant les teneurs : très faible (< teneur ne permettant d'atteindre que 50% de la production potentielle des cultures), faible (< 70%), moyen (< 70% à 90%), forte (100%) et très forte (> 100% ou teneur suffisante permettant d'obtenir plus de 100% de la productivité potentielle).

Pour chaque région, il faut également procéder au calibrage afin de permettre de recommander de l'engrais, en fonction de l'analyse de sol.

S'il n'y a pas de tableaux adaptés à l'interprétation des données et aux recommandations en matière de fertilisation, on peut extrapoler les données concernant les régions semblables en matière de climat, de sol, de cultures et de technologies d'exploitation agricole. Cette procédure doit être adoptée en tant que procédé palliatif jusqu'à ce qu'on puisse développer des tableaux pour l'interprétation des résultats et pour les recommandations en matière de fertilisation de chaque culture et de chaque endroit (région, province ou pays).

La fertilisation du système de production

La zone pressentie à recevoir le système de production doit être étudiée au moyen d'échantillonnage et d'analyses de sol. Cela permettra, si c'est possible, de corriger le pH, de réduire les teneurs en Al^{3+} échangeables, d'augmenter les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , P et K disponibles. On doit s'occuper également des couches sous-superficielles car l'acidité élevée peut limiter la croissance des racines et empêcher l'accès à l'eau et aux nutriments qui se trouvent, ceux-ci étant critiques s'il y a notamment une tension hydrique. Dans ce cas, l'analyse doit être effectuée à une profondeur de 20 cm à 40 cm ou de 40 cm à 60 cm.

Une fois les corrections nécessaires sur la zone effectuées, les fertilisations par culture peuvent y avoir lieu afin d'obtenir les niveaux de productivité souhaités. C'est à dire, la quantité d'engrais peut être réglable en fonction de la productivité attendue. Peuvent être utilisés (par culture) :

- Coton (jusqu'à 5,0 t ha⁻¹) : appliquer 30-20-30+5+0,5 de N, P₂O₅, K₂O, S et B, kilos par hectare par tonne de coton graine.
- Maïs (jusqu'à 7,0 t ha⁻¹) : appliquer 30-20-20+5+0,5 de N, P₂O₅, K₂O, S et Zn, kilos par hectare par tonne de graines.

- Sorgho et mil (jusqu'à 4 t ha⁻¹) : appliquer 30-20-20+5+0,5 de N, P₂O₅, K₂O, S et Zn, kilos par hectare par tonne de graines.
- Le niébé et les arachides peuvent être cultivés en profitant des résidus de récoltes précédentes.
- Haricots (jusqu'à 3 t ha⁻¹) : appliquer 30-20-20+5 de N, P₂O₅, K₂O et S par kilos par hectare par tonne de graines.

Au-delà des seuils de productivité attendus, la fertilisation doit être réglée car il y a un déséquilibre entre les nutriments appliqués.

Ainsi, lorsqu'une zone ne produit que 3 t ha⁻¹ de coton graine, il faut la fertiliser comme suit : appliquer 90-60-90+15+1,5 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, S et Zn, respectivement. On augmente cette application si la variété présente un potentiel élevé ou l'on la réduit si ce seuil de production ne pourra pas être réalisé.

Il est important de fertiliser en fonction des données réelles issues de recherche menée sur place. L'usage de données issues d'autres régions augmente le risque d'échec de la fertilisation ; néanmoins, ces données ne peuvent être utilisées que comme procédé palliatif alors qu'on développe localement une base de recherche fiable permettant de recommander la fertilisation aux cultures mises en place dans la région. Par conséquent, la réalisation d'un ensemble important d'essais de fertilisation, afin de mesurer la réponse des principales cultures de chaque pays en matière d'usage de chacun des nutriments (macro et micro), concernant les sols où elles sont ou seront potentiellement semées, s'avère essentiel pour maximiser l'efficacité de l'usage de fertilisants.

Références

- CARRUTHERS, I. ; RODRIGUEZ, M. **Tools for agriculture** : a guide to appropriate equipment for smallholder farmers. 4th edition. London, GB : Intermediate Technology Publications, 1992. 270 p.
- CARVALHO, M. C. S. ; FERREIRA, G. B. ; STAUT, L. A. Nutrição, calagem e adubação do algodoeiro. In : FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no cerrado do Brasil**. Aparecida de Goiânia : Mundial Gráfica, 2011. p. 677-752.
- COELHO, A. M. ; FRANÇA, G. E. de ; PITTA, G. V. E. ; ALVES, V. L. C. ; HERNANI, L. C. Fertilidade do solos : nutrição e adubação do milho. In : EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistema de produção**, 1. Disponível em : <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho_2ed/feraduba.htm>. Acesso em : 6 ago. 2012.
- MOREIRA, F. M. S. ; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras : Editora Ufla, 2006. 729 p.
- SANTOS, F. C. dos ; COELHO, A. M. ; RESENDE, A. V. ; ASSIS, R. L. de. Fertilidade de solos. In : EMBRAPA MILHO E SORGO. **Sistema de produção**, 3 : cultivo de milheto. Disponível em : <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milheto/CultivodoMilheto_3ed/adubacao.htm>. Acesso em : 6 ago. 2012.
- SILVA, A. G. ; CRUSCIOL, C. A. C. ; SORATTO, R. P. ; COSTA, C. H. M. ; FERRARI NETO, J. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura e cultivo da mamona em sucessão no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 40, n. 10, p. 2092-2098, 2010.
- SILVA, I. R. ; MENDONÇA, E. de SÁ. Matéria orgânica do solo. In : NOVAIS, R. F. ; ALVAREZ V. H. ; BARROS, N. F. ; FONTES, R. L. F. ; CANTARUTTI, R. B. ; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 276-374.

Impression et façonnage
Embrapa Information Technologique

*Le papier utilisé dans cette publication a été produit selon la certification
du Bureau Veritas Quality International (BVQI) de Gestion Forestière.*

Le projet Appui au Développement du Secteur Cotonnier des Pays du C-4 (Bénin, Burkina Faso, Tchad et Mali), ou Coton-4, qui a débuté en 2009, a constitué le premier Projet Structurant coordonné par l'ABC et exécuté par l'Embrapa. Durant cette période d'exécution, les chercheurs de l'Embrapa Coton ont fourni des informations et des techniques importantes portant sur le semis direct, l'amélioration génétique et la lutte intégrée contre les ravageurs du cotonnier consolidées au Brésil et qui pourront être incorporées aux systèmes de production de ces pays africains moyennant la réalisation d'ajustements et d'adaptations locales tout en respectant l'identité socio-culturelle et les caractéristiques édaphoclimatiques de chaque pays.

Le présent Manuel des bonnes pratiques agricoles est le fruit des tests adaptatifs et de l'échange de connaissances réalisées entre le Brésil à travers l'Embrapa et les pays du C-4 par l'intermédiaire de leurs institutions de recherche partenaires au sein de ce projet : l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA) du Burkina Faso, l'Institut Tchadien de Recherche Agronomique pour le Développement (ITRAD) et l'Institut d'Économie Rurale (IER) du Mali.