

CSEFD

Les dossiers
thématiques

Numéro 11

L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE POUR UNE AGRICULTURE DURABLE DANS LES ZONES ARIDES ET SEMI-ARIDES D'AFRIQUE DE L'OUEST



AGROPOLIS
INTERNATIONAL



Comité Scientifique Français de la Désertification
French Scientific Committee on Desertification

Les dossiers thématiques du CSFD numéro 11

Directeur de la publication

Richard Escadafal

Président du CSFD

Directeur de recherche de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) au Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Toulouse)

Coordinateurs

- **Dominique Masse**, dominique.masse@ird.fr
Agronomie-Écologie, Institut de recherche pour le développement, IRD
- **Jean-Luc Chotte**, jean-luc.chotte@ird.fr
Écologie des sols-Diversité microbienne, IRD
- **Éric Scopel**, eric.scopel@cirad.fr
Ingénierie écologique, Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, Cirad

Auteurs

Amadou Bâ (Université des Antilles et de la Guyane), Adeline Barnaud (IRD), Bernard Barthès (IRD), Ronald Bellefontaine (Cirad), Cécile Berthouly (IRD), Marc Bied-Charreton (Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, UVSQ), Mélanie Blanchard (Cirad), Thierry Brévault (Cirad), Jean-Luc Chotte (IRD), Pascal Clouel (Cirad), Laurent Cournac (Cirad), Géraldine Derroire (Université de Bangor, Royaume-Uni), Diégane Diouf (Université Cheikh Anta Diop, UCAD, Sénégal), Francis Do Rego (IRD), Jean-Jacques Drevon (Institut national de la recherche agronomique, Inra), Sergio Miana de Faria (*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa*), Jean-Michel Harmand (Cirad), Edmond Hien (Université de Ouagadougou, Burkina Faso), Aboubacry Kane (UCAD), Lydie Lardy (IRD), Raphaël Manlay (AgroParisTech), Florent Maraux (Cirad), Dominique Masse (IRD), Krishna Naudin (Cirad), Rabah Lahmar (Cirad), Mélanie Requier-Desjardins (Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier, IAMM), Éric Scopel (Cirad), Josiane Seghieri (IRD), Georges Serpantié (IRD), Fagaye Sissoko (Institut d'Économie Rurale, IER, Mali), Valérie Soti (Cirad), Cheikh Thiaw (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles, ISRA), Éric Vall (Cirad), Jonathan Vayssières (Cirad), Yves Vigouroux (IRD), Tatiana Krasova Wade (IRD).

Coordination éditoriale et rédaction

Isabelle Amsallem, amsallem@agropolis.fr

Agropolis Productions

Réalisation

Frédéric Pruneau, pruneauproduction@gmail.com

Pruneau Production

Remerciements pour les illustrations



Christelle Mary (Photothèque INDIGO, IRD), **Bernard Bonnet** (Iram), **Krishna Naudin** (Cirad), ainsi

que les auteurs des différentes photos présentes dans le dossier.

Impression : Pure Impression (Mauguio, France)

Dépôt légal : à parution • ISSN : 1772-6964

Imprimé à 1 500 exemplaires

© CSFD / Agropolis International, septembre 2015.

Comité Scientifique Français de la Désertification

La création, en 1997, du Comité Scientifique Français de la Désertification, CSFD, répond à une double préoccupation des ministères en charge de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification. Il s'agit d'une part de la volonté de mobiliser la communauté scientifique française compétente en matière de désertification, de dégradation des terres et de développement des régions arides, semi-arides et subhumides afin de produire des connaissances et servir de guide et de conseil aux décideurs politiques et aux acteurs de la lutte. D'autre part, il s'agit de renforcer le positionnement de cette communauté dans le contexte international. Pour répondre à ces attentes, le CSFD se veut une force d'analyse et d'évaluation, de prospective et de suivi, d'information et de promotion. Le CSFD participe également, dans le cadre des délégations françaises, aux différentes réunions statutaires des organes de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification : Conférences des Parties, Comité de la Science et de la Technologie, Comité du suivi de la mise en œuvre de la Convention. Il est également acteur des réunions au niveau européen et international. Il contribue aux activités de plaidoyer en faveur du développement des zones sèches, en relation avec la société civile et les médias. Il coopère avec le réseau international DNI, *DesertNet International*.

Le CSFD est composé d'une vingtaine de membres et d'un Président, nommés *intuitu personae* par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et issus des différents champs disciplinaires et des principaux organismes et universités concernés. Le CSFD est géré et hébergé par Agropolis International qui rassemble, à Montpellier et dans le Languedoc-Roussillon, une très importante communauté scientifique spécialisée dans l'agriculture, l'alimentation et l'environnement des pays tropicaux et méditerranéens. Le Comité agit comme un organe indépendant et ses avis n'ont pas de pouvoir décisionnel. Il n'a pas de personnalité juridique. Le financement de son fonctionnement est assuré par des contributions du ministère des Affaires étrangères et du Développement international, du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, ainsi que de l'Agence Française de Développement. La participation de ses membres à ses activités est gracieuse et fait partie de l'apport du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Pour en savoir plus

www.csf-desertification.org

La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français et de l'Agence Française de Développement. Les dossiers thématiques du CSFD sont téléchargeables sur le site Internet du Comité, www.csf-desertification.org

Pour référence

Masse D., Chotte J.-L. & Scopel E. (Coord.), 2015. L'ingénierie écologique pour une agriculture durable dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°11. Septembre 2015. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France. 60 pp.

Avant-propos

L'humanité doit dorénavant faire face à un problème d'envergure mondiale : la désertification, à la fois phénomène naturel et processus lié aux activités humaines. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n'ont été autant dégradés par notre présence. Longtemps considérée comme un problème local, la désertification fait désormais partie des questions de dimension planétaire pour lesquelles nous sommes tous concernés, scientifiques ou non, décideurs politiques ou non, habitants du Sud comme du Nord. Il est dans ce contexte urgent de mobiliser et de faire participer la société civile et, dans un premier temps, de lui fournir les éléments nécessaires à une meilleure compréhension du phénomène de désertification et de ses enjeux. Les connaissances scientifiques doivent alors être à la portée de tout un chacun et dans un langage compréhensible par le plus grand nombre.

C'est dans ce contexte que le Comité Scientifique Français de la Désertification a décidé de lancer une série intitulée « Les dossiers thématiques du CSFD » qui veut fournir une information scientifique valide sur la désertification, toutes ses implications et ses enjeux. Cette série s'adresse aux décideurs politiques et à leurs conseillers du Nord comme du Sud, mais également au grand public, aux journalistes scientifiques du développement et de l'environnement. Elle a aussi l'ambition de fournir aux enseignants, aux formateurs ainsi qu'aux personnes en formation des compléments sur différents champs disciplinaires. Enfin, elle entend

contribuer à la diffusion des connaissances auprès des acteurs de la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la lutte contre la pauvreté : responsables d'organisations professionnelles, d'organisations non gouvernementales et d'organisations de solidarité internationale.

Ces dossiers sont consacrés à différents thèmes aussi variés que les biens publics mondiaux, la télédétection, l'érosion éolienne, l'agroécologie, le pastoralisme, etc., afin de faire le point des connaissances sur ces différents sujets. Il s'agit également d'exposer des débats d'idées et de nouveaux concepts, y compris sur des questions controversées, d'exposer des méthodologies couramment utilisées et des résultats obtenus dans divers projets et, enfin, de fournir des références opérationnelles et intellectuelles, des adresses et des sites Internet utiles.

Ces dossiers sont largement diffusés notamment dans les pays les plus touchés par la désertification sous format électronique et via notre site Internet, mais également sous forme imprimée. Nous sommes à l'écoute de vos réactions et de vos propositions. La rédaction, la fabrication et la diffusion de ces dossiers sont entièrement à la charge du Comité, grâce à l'appui qu'il reçoit des ministères français et de l'Agence Française de Développement. Les avis exprimés dans les dossiers reçoivent l'aval du Comité.

RICHARD ESCADAFAL

PRÉSIDENT DU CSFD

DIRECTEUR DE RECHERCHE DE L'IRD
AU CENTRE D'ÉTUDES SPATIALES DE LA BIOSPHERE



Depuis maintenant une dizaine d'années, le Comité Scientifique Français de la Désertification a mis en œuvre une série de réflexions et a publié de nombreux dossiers concernant des thématiques peu traitées mais indispensables au développement des zones sèches : l'apport d'une agriculture en semis direct sous couvert végétal permanent, pourquoi faut-il investir en zones arides, la restauration du capital naturel, le pastoralisme en zone sèche, le carbone dans les sols. En cela le Comité a fait œuvre de pionnier car il a abordé des sujets transversaux qui concernent aussi bien la lutte contre la désertification et la dégradation des sols que la préservation de la biodiversité et l'adaptation des systèmes agricoles aux changements climatiques.

Ce dossier propose une réflexion sur les apports potentiels de l'ingénierie écologique dans la gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones sèches subsahariennes. Il contribue donc à décrire et à définir des pratiques agro-écologiques. De par l'expérience des auteurs et des contributeurs, l'exemple de l'Afrique de l'Ouest a été privilégié pour illustrer cette démarche d'intensification écologique de la production agricole au sens large, c'est-à-dire celle qui prend en compte également l'élevage et la production forestière. Des exemples issus de zones sèches du monde tropical non africain ont également pu être mobilisés pour illustrer le potentiel de cette ingénierie agro-écologique dans ce contexte climatique.

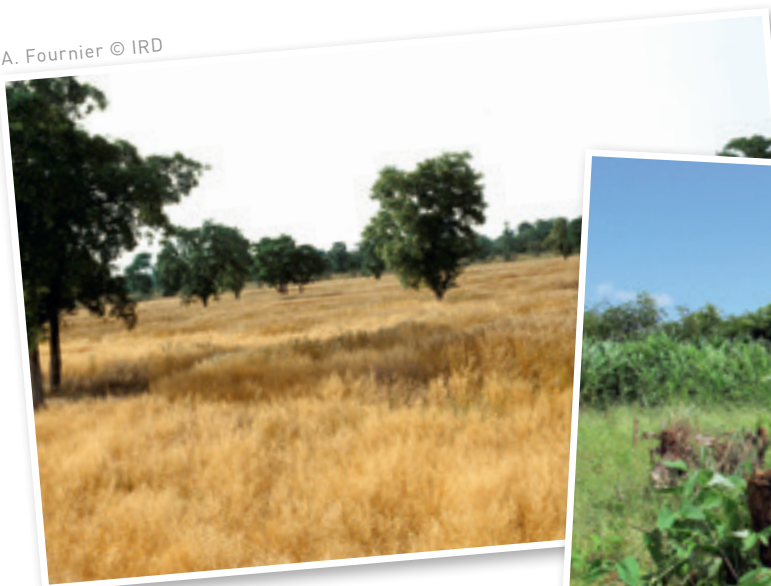
L'objectif n'est pas ici de discuter de l'ensemble des questions que pose le développement agricole mais d'aborder plus spécifiquement différents exemples qui nous semblent s'inscrire dans cette démarche d'ingénierie écologique. Après avoir rappelé quelques éléments essentiels qui caractérisent l'agriculture des zones sèches, des zones arides et des zones semi-arides, des exemples de processus biologiques ou écologiques dont la manipulation pourrait apporter des bénéfices aux systèmes agro-sylvo pastoraux sont proposés. Ces exemples s'adressent à différents déterminants du fonctionnement d'un écosystème, que ce soit la biodiversité, les flux de matières et d'énergie, ainsi que l'écologie des paysages. Le dossier se termine par une mise en perspective de ces pratiques dites agro-écologiques dans le contexte socio-économique du développement agricole des régions arides ou semi-arides en Afrique de l'Ouest. Naturellement tous les paramètres n'ont pas pu être approfondis. Ainsi, des questions essentielles comme la sécurisation foncière des parcelles ainsi restaurées, la stabilité des prix agricoles ou les problèmes d'apprentissage ou d'accompagnement, n'ont pas été traitées. Il faudra veiller à ce que ces techniques d'ingénierie écologique profitent aux agricultures familiales qui sont dominantes en zones sèches.

Ce dossier arrive au moment où, dans les instances internationales, il est fortement question de stopper la perte de la biodiversité, de stocker plus de carbone et de restaurer plus de terres qu'il ne s'en dégrade, et on doit remercier les auteurs d'avoir su exposer aussi clairement des techniques parfois complexes mais qui sont, par nature, durables.

MARC BIED-CHARRETON

PROFESSEUR ÉMÉRITE DE L'UNIVERSITÉ DE VERSAILLES
SAINT-QUENTIN-EN-YVELINES
PRÉSIDENT D'HONNEUR DU CSFD

A. Fournier © IRD



© A. Barnaud



© O. Husson



Sommaire

<u>L'agriculture des zones sèches d'Afrique de l'Ouest : de multiples fonctions et de fortes contraintes environnementales</u>	4
<u>Agir sur la biodiversité</u>	12
<u>Agir sur les cycles de la matière organique et des nutriments</u>	28
<u>Mieux utiliser l'eau disponible</u>	38
<u>Maîtriser les paysages et les processus écologiques propres à cette échelle</u>	46
<u>Contraintes économiques et sociales au développement d'une ingénierie écologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux des zones sèches</u>	50
<u>L'ingénierie écologique pour des systèmes agro-sylvo-pastoraux durables</u>	52
<u>Pour en savoir plus...</u>	54
<u>Lexique</u>	60
<u>Acronymes et abréviations</u>	60

L'agriculture des zones sèches d'Afrique de l'Ouest : de multiples fonctions et de fortes contraintes environnementales

Les régions arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest sont caractérisées par de fortes contraintes environnementales qui ont façonné les écosystèmes naturels et les activités humaines.

LE MANQUE D'EAU : UNE CARACTÉRISTIQUE DES ZONES SÈCHES

Les zones arides et semi-arides, rassemblées sous le terme « zones sèches », se définissent avant tout par les conditions climatiques auxquelles elles sont soumises: de faibles précipitations, peu fréquentes, irrégulières,

imprévisibles et concentrées sur quelques mois, des températures, insolation et évaporation fortes, et une faible humidité de l'air. Le caractère aride ou semi-aride se définit ainsi non seulement par la déficience de la pluviosité totale annuelle, mais également par une saison humide de courte durée réduisant la période de végétation à moins de quatre mois, et par l'irrégularité des épisodes pluvieux au cours de la saison des pluies. Ainsi, la faune, la flore et les écosystèmes naturels, de même que les activités humaines à l'image de l'agriculture, se sont façonnés dans ce contexte d'insécurité ou de risque climatique.

▼ Paysage au Mali.

Acacia Raddiana, plaine des monts de Hombori.

V. Robert © IRD

→ ZOOM | Quels futurs climats en Afrique de l'Ouest ?

Les modèles de prévision indiquent que les climats du futur en Afrique seront caractérisés par une recrudescence des événements extrêmes — des périodes de sécheresse ainsi que des vagues de chaleur et des inondations à la suite de fortes pluies. Les projections réalisées pour le milieu du XXI^e siècle indiquent que la bande du Sahel sera fortement exposée à ces événements. En effet, les scénarios mettent en évidence une augmentation du nombre de jours de forte chaleur qui atteindra plus de 100 jours par an (actuellement, ces vagues de chaleur durent entre 26 et 76 jours par an).

Différentes évolutions de la pluviométrie sont envisagées selon les sous-régions : les modèles montrent une augmentation de la pluviométrie annuelle et un risque accru d'inondation en Afrique centrale et en Afrique de l'Est et une baisse de la pluviométrie à l'Ouest du Sahel, en particulier au début de la saison de mousson qui est une période critique pour l'installation des cultures annuelles.

Cette opposition entre l'Ouest et l'Est du Sahel en termes d'évolution pluviométrique ne se retrouve pas pour les températures qui montrent, au contraire, un réchauffement selon un gradient latitudinal avec les régions au Nord du Sahel qui se réchauffent davantage que celles du Sud. L'augmentation des températures au milieu du XXI^e siècle est si importante (plus de 3°C dans certaines localités) qu'il n'existera bientôt aucun climat africain analogue dans l'histoire récente.

Les projections climatiques futures sont variables et incertaines. Il n'est pas facile d'anticiper les impacts sur l'activité agricole des changements climatiques en Afrique de l'Ouest. À ce titre, il est nécessaire de développer des modèles climatiques à des échelles d'espace et de temps adaptées aux enjeux agricoles. Actuellement, très peu d'outils basés sur des prévisions météorologiques sont utilisés par les producteurs agricoles leur permettant de mieux gérer le risque climatique et d'adapter leurs pratiques à ces prévisions. L'accessibilité des données et des prévisions météorologiques, mais également l'inadaptation de ces prévisions aux besoins des producteurs (échelles spatiale et temporelle, délai de prévision, degré de confiance) sont les principaux freins à leur développement dans les régions subsahariennes.

LE SOL : UNE RESSOURCE NATURELLEMENT LIMITÉE

Les sols des régions arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest peuvent être fortement évolués, comme les sols ferrugineux lessivés, ou peu évolués, tels que les sols dunaires ou alluviaux. Mais tous sont généralement caractérisés par une texture grossière en surface et par des teneurs en matière organique et en éléments nutritifs pour les plantes relativement faibles. Il existe aussi, bien sûr, des sols aux teneurs en matière organique relativement élevées et, d'un point de vue nutritif, plus riches pour les plantes, notamment dans les parties basses des bassins versants ou dans les grandes plaines alluviales.

En dehors de ces teneurs en matière organique et en nutriments, deux autres indicateurs permettent d'évaluer le potentiel agronomique ou la capacité de production primaire des sols. Il s'agit tout d'abord de la profondeur du sol qui détermine le volume que pourront exploiter facilement les racines. L'autre indicateur est l'état de la fine couche superficielle du sol qui, si elle est encroûtée, peut limiter physiquement toute pénétration de l'eau, voire modifier la structure racinaire des plantes qui s'y développent. Ces différents paramètres signalent des processus de dégradation des sols auxquels s'ajoutent des phénomènes d'érosion et de pertes en terre parfois conséquents et qui sont généralement attribués à la diminution de la couverture protectrice des sols par la végétation. Cette couverture végétale peut diminuer du fait de la surexploitation pastorale, de prélèvements intenses de bois-énergie, de l'augmentation de la fréquence des feux de brousses et de l'augmentation des surfaces cultivées. Le sol est alors à la merci de pluies très agressives. On rencontre ainsi, dans toutes ces régions, des paysages à la végétation clairsemée, aux sols totalement encroûtés et où les processus de dégradation s'intensifient aboutissant, parfois, à un état quasi-désertifié.

D'autres types de dégradation des sols sont également observés dans ces régions, tels que la salinisation. Parfois, celle-ci est naturellement liée à la présence d'une nappe d'eau salée. L'apparition de sols salés dans les zones sèches peut aussi être la conséquence de pratiques d'irrigation et de drainage mal maîtrisées.

DES ÉCOSYSTÈMES FAÇONNÉS PAR LES CONTRAINTES HYDRIQUES ET ÉDAPHIQUES

Risque climatique élevé et sols anciens ont façonné les écosystèmes des zones arides et semi-arides. Les organismes vivants rencontrés dans ces régions, notamment les plantes, présentent une adaptation totale à ces conditions environnementales difficiles : arbres xérophiiles, herbacées annuelles à croissance très rapide capables de réaliser leur cycle en quelques semaines, herbacées pérennes plus efficaces en termes d'utilisation des nutriments (comme *Andropogon gayanus*, cf. page suivante).

Les interactions entre ces organismes découlent de ces contraintes. La structure des écosystèmes naturels est alors adaptée à ce contexte d'aridité plus ou moins prolongé comme celle de formations végétales telles que les savanes, associant strates arborée et herbacée, ou encore de la brousse tigrée formée d'une alternance de bandes avec et sans végétation (cf. page 7). En outre, partager les ressources entre individus est le *leitmotiv* de ces écosystèmes : par exemple, les arbres prélèvent, grâce à leur système racinaire, l'eau et les nutriments en profondeur et en redistribuent une partie en surface à la strate herbacée.



▲ Efflorescences salines (sulfates d'aluminium et/ou fer) formées à la surface du sol en croûtes discontinues. Sénégal.
J.-P. Montoroi © IRD

→ ZOOM | *Andropogon gayanus*, une graminée pérenne se développant en circuit fermé ?

Andropogon gayanus est une graminée largement répandue dans les savanes d'Afrique de l'Ouest. Elle apparaît après quelques années de jachère (environ 6 ans) et elle est considérée par les paysans comme un signe de fertilité des sols. En plus d'être appréciée par le bétail, *A. gayanus* fournit des pailles qui entrent dans la fabrication d'objets divers et sont utilisées pour l'habitat.

A. gayanus est une graminée pérenne et, à ce titre, se développe sous forme de souches présentant un fort enracinement. À l'image des graminées pérennes que l'on rencontre dans les savanes des zones soudano-sahéliennes, elle a la particularité de pouvoir, après quelques années suivant son installation, mettre en place un cycle fermé de nutriments (c.-à-d. avec des pertes minimales de ces nutriments). En effet, ce cycle est basé sur une minéralisation rapide des résidus de racines ou des litières qu'elle produit et par l'absorption immédiate par ses racines des éléments nutritifs issus de cette décomposition. Ces processus de concentration et de conservation des ressources minérales permettent ainsi à la plante, d'une part, de se développer sur des sols pauvres en nutriments et, d'autre part, à ces formations végétales d'assurer une production primaire intense après un certain nombre d'années d'abandon cultural.

Le raccourcissement de la durée des jachères, parfois combiné à l'augmentation de la fréquence des feux de brousses et/ou du pâturage, fait qu'*A. gayanus* a tendance à disparaître,

n'ayant plus le temps nécessaire pour se régénérer. Toutefois, l'introduction de cette plante dans des jachères de courte durée a permis d'obtenir jusqu'à 25 tonnes de matière sèche par hectare au bout de deux ans au Burkina Faso (Serpantié & Ouattara, 2001).



▲ Jachère à *Andropogon gayanus* au moment de la remise en culture, Burkina Faso.

En début de la saison des pluies, on distingue particulièrement bien les tiges sèches de l'année écoulée et les repousses de l'année qui commence (jeunes feuilles vertes).

S. Dugast © IRD

DES PRATIQUES AGRICOLES ET PASTORALES ADAPTÉES À CES CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES

Les activités agricoles et pastorales, très présentes dans les régions sèches, se sont également adaptées au fil du temps à ces contraintes au travers d'une intégration « ligneux-agriculture-élevage ». Cette intégration apparaît au sein d'une exploitation, des villages — où éleveurs et agriculteurs coexistent et où arbres et cultures se côtoient — mais également à l'échelle de plus vastes territoires à travers le pastoralisme nomade et les pratiques de transhumance.

Les vastes espaces des régions les plus arides (telles que la zone sahélienne) sont généralement voués à l'élevage pastoral. Dans les régions un peu plus arrosées, au-delà de 400 mm de pluie par an, l'agriculture apparaît plus nettement, parfois loin des zones naturellement bien pourvues en eau comme les vallées des fleuves. Historiquement, les techniques d'irrigation ont été peu développées dans les agricultures de savane au sud du Sahara et l'agriculture dite « pluviale » y domine largement (Pélissier, 1966). En dehors des activités agricoles proprement dites, d'autres ressources, telles que les ligneux, sont exploitées et font généralement

l'objet d'une gestion par les populations locales. Cela touche les arbres des savanes ou des forêts, mais aussi les arbres hors forêt*, que ce soit dans les champs cultivés ou dans les villages.



▲ Parc à nérés et petit grenier aux environs du village de Kobané, Guinée.

E. Bernus © IRD

* Les termes définis dans le lexique (page 60) apparaissent en bleu et sont soulignés dans le texte.

→ ZOOM | Des formations végétales adaptées à un contexte d'aridité prolongé : les savanes et les brousses tigrées

La savane : l'écosystème de référence d'Afrique de l'Ouest

Les savanes constituent la formation écologique majeure d'Afrique de l'Ouest. Elles sont caractérisées par l'association étroite d'une strate arborée et d'une strate herbacée dont les compositions et les structures respectives varient selon les conditions de température et d'humidité du sol (pédoclimat). Les conditions environnementales — notamment une période de sécheresse au cours de l'année — façonnent leur composition floristique. Le feu influe également cette dernière ainsi que la structure des différentes strates.

Les relations existant entre arbres et herbes sont étroites. Elles peuvent être de l'ordre de la compétition notamment pour la lumière, l'eau et les éléments nutritifs contenus dans le sol. Mais, généralement, un partage de ces ressources se met en place : les arbres puisent des éléments nutritifs dans les horizons profonds du sol et les restituent en partie à la surface à travers les litières que l'arbre produit. Certains arbres seraient également capables de remonter de l'eau, laquelle profiterait aux herbacées en contact avec ces arbres. Les savanes sont également impactées par les animaux qui y vivent, que ce soit les animaux sauvages ou les animaux domestiques qui les parcourent. Il a ainsi été démontré que le broutage par les animaux sauvages permettait, dans une certaine mesure, d'augmenter la productivité d'une savane.

Ainsi, malgré des contraintes environnementales importantes, les savanes présentent, dans certaines conditions, de très fortes productions primaires. Ces observations paradoxales sont à mettre à l'actif de ces structures associant différentes formes végétales complémentaires (arbres, herbacées annuelles ou pérennes), différents organismes microbiens (rhizobium, mycorhizes ou autres microorganismes bénéfiques à la croissance de la plante, *(cf. p. 13)*), et adaptées à la présence de grands mammifères. Il existe, en effet, dans les savanes, des stratégies spécifiques d'exploration du sol par les systèmes racinaires grâce aux champignons mycorhiziens, de captation

de l'azote atmosphérique par des microorganismes (notamment ceux en symbiose avec les légumineuses), de transferts de nutriments entre différents organismes et d'amélioration de l'efficacité d'utilisation de ces nutriments.

Comprendre le fonctionnement de ces savanes — écosystème naturel de référence des régions arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest par excellence — apporte ainsi des éléments pour une ingénierie écologique de l'exploitation de ces milieux.

La brousse tigrée ou comment produire plus et durablement en couvrant moins d'espace

Les régions sahéliennes du Niger présentent un paysage bien particulier constitué d'une alternance de bandes sans végétation et de bandes végétalisées. Ces bandes sont positionnées perpendiculairement au sens d'écoulement du ruissellement. Cette organisation spatiale donne l'aspect d'une peau de tigre sur les images aériennes d'où son nom de « brousse tigrée ».

L'originalité de cette formation végétale est sa dynamique spatiale et temporelle avec un déplacement des bandes de l'aval vers l'amont. Ce phénomène est lié au rôle d'impluvium que joue la bande de sol nu au profit de la bande végétalisée. Cette dernière capte aussi, en plus des eaux de pluie, les résidus organiques transportés par les eaux de ruissellement et par le vent. La partie aval de la bande de végétation subit, quant à elle, une érosion faisant apparaître un sol dénudé.

Ainsi, cette formation végétale est un système particulièrement bien adapté aux conditions rencontrées dans la région sahélienne, avec une production primaire plus importante en termes de biomasse qu'un écosystème recouvert d'une formation végétale continue. Le maintien ou la restauration de la productivité de ces milieux peut ainsi s'inspirer de ce fonctionnement naturel.

D'après Valentin & d'Herbés, 1999.

La productivité d'un **agrosystème** dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes est basée sur son organisation spatiale et temporelle afin de produire de façon optimale et durable les ressources agricoles nécessaires à une population :

- spatialement, des zones cultivées sont associées à des zones non cultivées, ce qui permet les échanges et les transferts de ressources organiques entre ces deux types de zone (*cf. page suivante* par exemple les terroirs villageois en auréole) ;
- temporellement, la rotation « culture-jachère » permet une reconstitution de la ressource organique disponible.

Deux éléments-clés semblent permettre une productivité suffisante dans le contexte environnemental des zones arides et semi-arides au Sud du Sahara :

- les arbres assurent plusieurs fonctions dans les

cycles de nutriments et de l'eau. Ils ont des fonctions de production (bois, fruits, fourrages, médicaments, etc.) et culturelles (par exemple les bois sacrés). Ces arbres se situent dans les forêts en lisière des terroirs villageois, dans les jachères ou associés aux cultures sous forme de parcs agroforestiers ou de haies ;

- l'élevage qui, malgré une certaine dualité avec les activités agricoles, est souvent associé à l'agriculture. Les agriculteurs possèdent en effet des animaux domestiques produisant viande et lait, et constituant une forme de capitalisation. Les animaux de trait sont également très répandus dans de nombreuses régions (cheval, bœuf, âne, etc.). Enfin, les éleveurs nomades, pratiquant la transhumance pour nourrir leurs animaux, traversent des zones agricoles et assurent ainsi des transferts de fertilité à travers le recyclage des fèces.

→ ZOOM | **Les terroirs villageois en auréole**

Caractéristiques des systèmes agropastoraux traditionnels vivant de manière autarcique, les terroirs villageois dans les savanes d’Afrique de l’Ouest sont organisés en auréoles concentriques selon un gradient décroissant d’intensification agricole et de contrôle foncier (Prudencio, 1993 ; Péliissier 1966 ; Ruthenberg, 1980).

Trois principales auréoles se distinguent :

- les champs de case réservés à la culture maraichère continue avec des pratiques intensives de gestion de la fertilité (fumure animale, épandage des déchets domestiques). Cette auréole garantit la sécurité alimentaire des habitants ;
- les champs dits « de brousse » où une agriculture semi-permanente côtoie plus ou moins une agriculture continue selon les propriétés du sol, les besoins alimentaires et de trésorerie ainsi que la disponibilité en bétail. La culture alterne avec des jachères de plus ou moins longue durée qui constituent alors un réservoir de terres cultivées et de diverses biodiversités ;
- une auréole de savanes arborées ou de forêts, non cultivée pendant plusieurs décennies, est soumise à une appropriation communautaire. Elle constitue une source de fourrages, de bois et d’autres produits ligneux ou non ligneux.

L’arbre est souvent présent dans le paysage. Les zones de culture abritent généralement de nombreux arbres aux multiples usages. Cette organisation crée une hétérogénéité dans le paysage agricole à diverses échelles — de l’arbre dans les jachères aux différents modes d’occupation des terres —, le tout relié par des flux de matières et d’énergie que les pratiques agro-sylvo-pastorales entretiennent. Cultiver après une jachère arborée permet ainsi de faire bénéficier à la plante cultivée des éléments nutritifs captés par les arbres en profondeur

au cours de période d’abandon culturel. De même, à travers les déjections des animaux domestiques sur les champs où ils sont parqués la nuit, des éléments fertilisants sont transférés des zones non cultivées vers les zones cultivées. Cette organisation peut être vue comme une stratégie pour réduire les risques climatique et phytosanitaire dans la pratique culturale. En outre, les flux concentriques de ressources en nutriments et d’énergie seraient un gage de productivité dans un environnement pauvre en éléments nutritifs disponibles pour les plantes et dans un contexte de disponibilité en eau fortement aléatoire. Ces éléments, combinés à la biodiversité (des microorganismes aux plantes) et aux organisations des sociétés humaines, contribueraient fortement à la viabilité de ces agro-socio-écosystèmes.



▲ **Vue aérienne du village de Djoumté et de son auréole de cultures de case (arachide et mil) en saison des pluies. Nord-Cameroun.**

J.-J. Lemasson © IRD

Dans les régions des savanes semi-arides à faible densité de population, la rotation « culture-jachère » a ainsi longtemps permis d’assurer une productivité suffisante. Toutefois, ce cycle a été perturbé par l’accroissement de la pression démographique sur les terres et l’introduction de nouvelles cultures (*cf. ci-dessous*). Dès lors que la population augmente, l’intégration agriculture-élevage et les transferts de fertilité associés, deviennent essentiels pour assurer une productivité suffisante des sols cultivés.

Enfin, la présence de parcs arborés dans des zones à très forte pression démographique, est primordiale, notamment dans les régions sèches au risque climatique accru.

En outre, bien que traditionnellement peu répandues, certaines techniques de maîtrise de l’eau permettent de produire ou d’améliorer la productivité pendant la saison des pluies, mais, surtout, en dehors, avec de petites irrigations des cultures, souvent maraichères, autour d’un puits, d’un bas-fond ou le long de cours d’eau et de fleuves.



▲ **Agriculture et élevage au Bénin.**

La culture de céréales (mil et sorgho) et l’élevage sont deux ressources importantes du milieu rural au Bénin.

M. Donnat © IRD

Les plantes cultivées sont également adaptées à ces régions sèches. Le mil est la plante cultivée emblématique des régions sèches subsahariennes (*cf. page 10*).

→ ZOOM | Les jachères : disparition d'un élément-clé des agricultures de savane

Dans les agricultures de savane, une utilisation courante des sols consiste souvent en une phase de culture de quelques années, suivie, après la baisse des rendements, d'un abandon cultural de durée variable. Cette seconde phase, appelée « jachère », permet de restaurer la fertilité des sols et les potentialités agronomiques et écologiques du milieu grâce à un retour à la strate arbustive ou arborée. Par ailleurs, la jachère n'est pas considérée par les communautés rurales comme une simple mise en dormance de l'agriculture, mais aussi comme un lieu de production où paysans et éleveurs exploitent des ressources fourragères, ligneuses, fruitières, ainsi que des plantes utilisées en pharmacopée. Le système de rotation « culture-jachère » apparaît ainsi comme un mode de gestion des ressources des savanes africaines.

Ce cycle « culture-jachère » a été plus ou moins fortement perturbé par l'accroissement de la pression démographique, l'introduction de nouvelles cultures et, par conséquent, par une demande accrue en terres agricoles. Les durées des jachères se sont raccourcies, laissant parfois la place à une mise en culture permanente. Sur les jachères restantes, l'augmentation des prélèvements de bois et l'intensification du pâturage sur des zones réduites, diminuent les fonctions de production de ces zones non cultivées. Avec une durée de repos raccourcie, la régénération naturelle devient moins efficace et s'accompagne

d'une baisse de la biodiversité. Le dysfonctionnement hydrique ainsi que l'érosion ont tendance à s'installer de façon alarmante sur des terres de plus en plus dégradées. Tous ces phénomènes ont créé, sur les terroirs traditionnels, une situation de crise aux conséquences socioéconomiques très importantes.

Les recherches menées entre 1994 et 2000 par un consortium d'instituts et d'universités ouest-africaines et européennes ont montré l'importance de l'arbre dans les agrosystèmes, notamment par son rôle de restauration de la fertilité (Floret & Pontanier, 2000). Le parc arboré, association d'arbres et de cultures, est très répandu dans les régions intensément cultivées des régions soudano-sahéliennes. Il permet de maintenir la présence et donc les fonctions de l'arbre dans les terroirs. Des méthodes de substitution à la jachère ont été avancées basées pour la plupart sur les techniques agroforestières : les jachères de courte durée avec des espèces à croissance rapide, les cultures en couloir (*alley cropping*), etc. Mais les techniques coûteuses de restauration d'une terre épuisée, trop sectorielles ou techniquement peu adaptées et ne prenant pas suffisamment en compte la dimension du terroir et les aspects sociaux tels que les questions foncières, n'ont pas toujours répondu aux espoirs de sociétés peu enclines à accepter des innovations sans intérêt et sur le court terme.



▲ Agriculture au Niger.

Séchage du sorgho.

A. Luxereau © IRD

Le sorgho — voire le maïs — est, quant à lui, cultivé dans des régions aux précipitations relativement plus abondantes ou dans les zones où la disponibilité en eau est augmentée (bas-fonds, plaines alluviales, terres argileuses, etc.). D'autres productions vivrières et de rente sont également présentes. L'arachide et le niébé sont des légumineuses importantes dans l'alimentation

des populations (protéines végétales). Ce sont également des sources d'azote intéressantes dans les rotations. Dans les grandes plaines alluviales, des programmes d'aménagement de terres irriguées favorisent une agriculture souvent très intensive, que ce soit pour produire du riz ou des productions maraîchères.

→ ZOOM | La culture du mil : un système de culture paysan adapté aux conditions sahéliennes

En 1992, Serpantié et Milleville concluait lors d'une conférence : « Les agriculteurs sahéliens ont trouvé dans le mil une plante apte à valoriser de courtes périodes humides et des sols souvent très pauvres, mais parfois abondamment fumés. Ils ont adapté leur système de culture et de production en fonction des aléas du milieu. En culture extensive sur sols sableux, ils bénéficient d'une culture peu exigeante, praticable avec peu de travail sur de grandes surfaces, affectées d'un rendement médiocre mais stable. Ils peuvent par ailleurs profiter de la croissance rapide et de potentiel de rendement non négligeable de cette plante lorsqu'ils la cultivent sur des sols travaillés et abondamment fumés, sous réserve d'un risque élevé et d'exigences en eau supérieure. Avec l'élevage, ils constituent l'armature des systèmes de production sahéliens. Ces deux types de système de culture sont souvent réunis dans l'exploitation agricole. De tels caractères adaptatifs doivent être connus et pris en compte dans les programmes d'amélioration du matériel végétal, ainsi que dans les travaux portant sur la mise au point de nouvelles techniques de culture. Ils doivent inciter à rechercher des alternatives techniques, et surtout à ne pas dissocier la plante des systèmes de culture qui l'intègrent lorsque l'on se propose d'évaluer les voies d'amélioration possibles. »

D'après Serpantié & Milleville, 1993.



▲ Le mil en route, Burkina Faso.

Des adolescentes portent la récolte de mil sur la route de Bobo Dioulasso.

J.-P. Guengant © IRD

REPENSER LA GESTION DES SYSTÈMES AGRICOLES ET NATURELS PAR L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

Dans le contexte actuel de contraintes croissantes, socioéconomiques¹ et climatiques, les agricultures des zones sèches sont en pleine évolution afin de s'adapter et de répondre à un double défi : produire plus pour satisfaire les besoins alimentaires importants de populations en croissance, mais aussi produire mieux. Le défi est alors d'augmenter la production agricole, forestière et animale de façon viable et durable (Tilman *et al.*, 2002). Une évolution rapide des agricultures de ces zones vers des modes de production à la fois plus productifs, économes en ressources naturelles et résistants aux aléas climatiques, est alors indispensable.

La petite agriculture familiale domine encore largement ces régions (*cf. ci-dessous*). Ces familles cherchent en premier lieu à assurer leur sécurité alimentaire. Dans un contexte climatique et socioéconomique relativement aléatoire, les objectifs d'intensification sont loin d'une recherche de la maximisation de la production, voire du profit, mais plutôt dans l'assurance de produire le minimum nécessaire. Toutefois, de nouvelles agricultures se développent en parallèle pour lesquelles les enjeux sont avant tout commerciaux. Elles peuvent être portées par des petits agriculteurs qui se trouvent dans des conditions commerciales favorables (comme à la périphérie des villes) ou par de grandes sociétés qui investissent dans des moyens de production importants pour répondre à des marchés ciblés (comme les sociétés de production de légumes pour l'exportation sur la vallée du fleuve Sénégal).

→ ZOOM | Les agricultures familiales : la grande majorité des agricultures des régions sèches ouest-africaines

Les exploitations agricoles familiales, dans leur grande diversité, assurent l'essentiel de la production agricole dans les régions arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest. L'agriculture familiale est définie par le fait que les prises de décision, l'apport de capital et le recours à la main d'œuvre sont quasi-exclusivement d'origine familiale. La taille de ces exploitations est souvent modeste (95 % cultivent moins de 5 ha en Afrique subsaharienne). Elles assurent différentes fonctions : production, emploi, gestion des ressources naturelles, permanence des cultures rurales, entretien des paysages ruraux.

¹ Pour plus d'informations sur les contraintes sociales et économiques, *cf. p. 50*.

Tous les producteurs, familiaux ou non, sont confrontés au besoin d'améliorer la productivité de leurs ressources (terre, travail) — les petits agriculteurs pour faire face à une pénurie de main d'œuvre liée à l'exode rural par exemple, les sociétés industrielles pour améliorer les profits.

Pour répondre à la forte croissance de la population depuis quelques décennies, la réponse première a été d'augmenter les surfaces cultivées. L'utilisation d'intrants chimiques ou de variétés améliorées, à la base des révolutions vertes sur d'autres continents, ne s'est pas développée dans les systèmes de production agricole ouest-africains hormis sur les cultures de rente telles que le coton ou l'arachide. Cette solution est toujours possible mais elle est confrontée à la faible capacité d'investissement de l'agriculture familiale et aux coûts prohibitifs des intrants de synthèse. Même si cette solution peut se concevoir à court terme, les changements climatiques en perspective ainsi que la dégradation des réserves fossiles et minières imposent aux agricultures d'Afrique subsaharienne — industrielles et familiales — de rechercher d'autres solutions.

Pour répondre à cet enjeu d'amélioration de la productivité tout en préservant les ressources naturelles et les moyens de production, on peut s'orienter pour ces régions vers une intensification écologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux comme nouveau paradigme pour le développement agricole (Griffon, 2006). Cette intensification des processus écologiques qui gouvernent ces systèmes vise une agriculture à la fois productive et durable, mais aussi économe en intrants fossiles et plus respectueuse de l'environnement.

Ceci implique de maîtriser la complexité des systèmes étudiés et de s'inspirer à la fois du fonctionnement des écosystèmes naturels de référence à la région agroécologique concernée — les savanes pour les zones sèches ouest-africaines — et des pratiques traditionnelles et savoir-faire locaux issus d'une longue adaptation face aux contraintes environnementales — les pratiques agro-sylvo-pastorales.

L'ingénierie écologique propose alors de nouvelles alternatives de gestion des systèmes agricoles et d'élevage plus adaptées aux nécessités sociales et environnementales en pleine transformation de ces régions (cf. ci-contre).

→ ZOOM | L'ingénierie écologique : une démarche pour identifier les bons compromis et innover !

L'ingénierie écologique est un concept hybride entre science et action, dont le périmètre a évolué au gré de controverses depuis sa création il y a une trentaine d'années (Mitsch, 2012). L'ingénierie écologique est ici définie au sens le plus large comme « la gestion d'écosystèmes et la conception d'aménagements durables, adaptatifs, multifonctionnels, inspirés de ou basés sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques » (Dutoit, 2013). Elle s'inspire de la proposition initiale d'Odum et Odum (2003) « *the environmental manipulation by man using small amounts of supplementary energy to control systems in which the main energy drivers are still coming from natural sources* »*.

Selon Mitsch et Jorgensen (2003), les objectifs de l'ingénierie écologique sont de restaurer des écosystèmes perturbés par les activités humaines et de développer des écosystèmes durables qui ont à la fois une valeur humaine et écologique. Les stratégies d'intervention sont basées sur les capacités d'auto-organisation et d'auto-entretien que possèdent les écosystèmes.

Cette démarche est également à l'origine du concept « d'agro-écologie » défini par Altieri (1995) comme étant l'application des concepts et principes écologiques à la conception et la gestion durable des systèmes agricoles ou d'élevage. Ces recherches s'appuient sur une approche scientifique fondée sur l'écologie (biodiversité, réseaux trophiques, dynamique des populations, cycles des nutriments, écologie des paysages, etc.) et une approche expérimentale pratique, permettant ainsi de tester de nouvelles pratiques et de confronter les théories écologiques à la réalité. Au-delà des sciences de l'écologie, les sciences de la complexité peuvent également offrir des cadres conceptuels (interactions, auto-organisation, émergence, multi-échelle, dynamique non-linéaire, etc.) permettant d'expliquer le fonctionnement des écosystèmes et de proposer des solutions innovantes pour mieux les gérer.

* « Agir sur l'environnement en utilisant très peu d'énergie supplémentaire pour contrôler ces transformations et dans lequel cette énergie motrice proviendrait pour l'essentiel des ressources naturelles. »



▲ Cultures maraichères au Niger.
Culture d'oignons et de légumineuses.
F. Boyer © IRD

Agir sur la biodiversité

La biodiversité — qui se définit par les formes, la composition et les structures internes des organismes qui la composent — est essentielle dans le fonctionnement des écosystèmes.

Elle détermine la productivité de ces écosystèmes, leur viabilité et leur stabilité dans le temps face à des perturbations extérieures. En effet, les organismes vivants, qu'ils soient du monde végétal ou animal, macro- ou micro-organismes, sont adaptés aux conditions qui les entourent. Cette adaptation, propre à chaque espèce, voire à chaque individu, permet à ces organismes de croître et de se reproduire dans des conditions données. Les interactions entre individus et entre groupes d'individus, aboutissent également à des structures dans l'espace qui permettent la survie des espèces. Par exemple, une termitière est une structure organisée complexe permettant à une population de termites de vivre mais également d'abriter d'autres espèces. Cette diversité contribue à définir la stabilité et la productivité des écosystèmes, et, plus largement, de l'ensemble des [services écosystémiques](#) tels que les services de production, de régulation, etc.

On peut aborder la biodiversité par la composition spécifique mais également par la diversité fonctionnelle : par exemple, les arbres, par leurs enracinements profonds, remontent en surface des éléments nutritifs pour les herbacées à travers la minéralisation de leur litière, ou encore les graminées pérennes créent des

zones préférentielles de recyclage des nutriments dans leurs rhizosphères, les termites recyclent les matières organiques riches en lignine dans des milieux très secs, les lombrics mélangent les litières et le sol, etc. Chacun de ces organismes joue une partition dans le fonctionnement d'un écosystème et les services qu'il rend. Leurs interactions, parfois complexes, définissent également des fonctions. Certaines interactions se révèlent essentielles comme le [mutualisme](#) ou la [symbiose](#) entre des microorganismes et des plantes (par exemple les champignons mycorhiziens et les arbres), la facilitation de la croissance de certaines organismes par d'autres organismes, la redondance des espèces qui rendent le même service — ce qui permet de maintenir un service même si l'une d'entre elles disparaît, etc.

Différents processus biologiques ou écologiques en lien avec la biodiversité peuvent ainsi être intensifiés au bénéfice des systèmes agro-sylvo-pastoraux présents dans les régions arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest, grâce à l'ingénierie écologique :

- en valorisant la diversité et l'activité des microorganismes du sol au profit des plantes ;
- en associant et en faisant collaborer des plantes.

▼ Début de la saison des pluies. Kindi, Burkina Faso.

© D. Masse



AGIR SUR LA DIVERSITÉ DES MICROORGANISMES DES SOLS AU BÉNÉFICE DES PLANTES

Quoique invisibles à l'œil nu, les microorganismes du sol représentent une composante essentielle de la vie sur terre. Les très nombreuses fonctions réalisées par ces organismes leur confèrent un rôle capital dans le fonctionnement des grands cycles biogéochimiques (cycles du C, N, P, etc.), en libérant les éléments nutritifs nécessaires aux plantes, en formant l'humus et en maintenant les propriétés physiques et chimiques des sols, les situant à la base même de la vie sur terre. De leurs activités dépendent donc directement la qualité et la productivité du sol, support de la croissance végétale.

Par exemple, les rhizobiums — des bactéries du sol — s'associent aux plantes de la famille des légumineuses — soja, haricot, lupin, arachide, etc. — en une symbiose qui se traduit par la formation d'organes particuliers au niveau des racines (parfois sur les tiges), appelés « nodosités », au sein desquels la bactérie fixe l'azote atmosphérique gazeux en une forme assimilable par la plante.

Autre exemple, les champignons mycorhizogènes, en colonisant le système racinaire, forment, avec la quasi-totalité des végétaux, une symbiose appelée « mycorhize ». En explorant un plus grand volume de sol par l'intermédiaire des filaments mycéliens du champignon, la mycorhize permet à la plante une meilleure absorption de l'eau et des éléments nutritifs, parmi lesquels le phosphore.

Ainsi, agir sur ces microorganismes et leur activité contribue à l'intensification écologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux ou à la réhabilitation de terres dégradées des zones sèches.



▲ Relations entre espèces végétales, sol et microorganismes. Sénégal. Récolte de niébé inoculé.
M. Neyra © IRD



▲ Relations entre espèces végétales, sol et microorganismes. Sénégal. Plantation d'*Acacia mellifera* inoculés (à droite) avec des rhizobiums et champignons sélectionnés et non inoculés (à gauche), trois mois après plantation.
M. Neyra © IRD

→ EXEMPLES | Des microorganismes du sol utilisés au bénéfice des plantes au Sénégal

Des symbioses microbiennes pour lutter contre la désertification au sein de la Grande Muraille Verte

Le projet panafricain de la « Grande Muraille Verte » (GMV) vise à lutter contre la désertification le long de la frange sahélienne par une **restauration écologique** et un développement socioéconomique intégré.

Au Sénégal, l'agence de la GMV a développé des actions de reconstitution de la végétation arborescente et herbacée et elle a également favorisé de nouvelles activités rémunératrices liées au maraîchage (par exemple l'oignon), à l'arboriculture fruitière (*Zizyphus mauritiana*, *Tamarindus indica*) ou à la production de fourrages. La recherche, notamment en écologie microbienne des sols, est intervenue pour proposer l'utilisation de microorganismes bénéfiques à la croissance des arbres afin d'intensifier la production agricole.

Dans ce contexte, deux stratégies basées sur le potentiel microbien symbiotique ont été privilégiées pour réhabiliter les sols dégradés et augmenter la productivité végétale sur des sols pauvres en nutriments :

- l'apport de champignons mycorhiziens à arbuscules et/ou de bactéries fixatrices d'azote (technique d'inoculation) ;
- l'utilisation de plantes mycotrophes — c.-à-d. portant sur leurs racines des champignons mycorrhizogènes — et rudérales — poussant sur les bords de chemins, les terrains vagues, les terrains de culture abandonnés — qui vont stimuler le potentiel microbien symbiotique des sols.

La disponibilité du phosphore et de l'azote est souvent un facteur limitant de la croissance végétale en zone sahélienne. Ainsi, la plupart des espèces agricoles — fruitiers forestiers et autres ligneux à usages multiples, plantes maraîchères ou légumineuses annuelles — dépendent de la présence de symbiotes fongiques et bactériens qui favorisent la nutrition

minérale des plantes. L'inoculation de ces organismes s'avère efficace notamment dans des situations où l'irrigation est possible. Par ailleurs, au début des plantations forestières et des cultures, il est possible d'apporter des phosphates naturels — ressource minérale dont regorgent les sols ouest-africains — et qui, sous l'action des structures mycorhiziennes, ont un « effet starter » pour augmenter le pool de phosphore mobilisable par les plantes.

Les sols des zones sahéliennes présentent généralement un nombre de propagules microbiens très faible. Afin de favoriser la plantation des ligneux dans ces zones, on privilégie alors une inoculation microbienne contrôlée des ligneux en pépinière, ce qui, après leur plantation, augmente leur productivité et reconstitue le potentiel microbien des sols dégradés.

Dans les sites où le nombre de propagules microbiens est plus élevé, l'objectif est alors d'augmenter le potentiel microbien des sols via la promotion d'herbacées pionnières mycotrophes et fixatrices d'azote (par exemple *Zornia glochidiata*, *Panicum* spp.) adaptées aux conditions de stress hydrique. En effet, un sol influencé par des herbacées mycotrophes stimule la mycorhization et la croissance en hauteur des ligneux avec des effets positifs sur l'activité microbienne des sols. De plus, la présence d'une couverture herbacée bien colonisée par des champignons mycorhiziens à arbuscules est à l'origine du potentiel mycorhizien élevé des sols de plantations ligneuses.

Néanmoins, il existe peu d'informations sur la diversité des champignons mycorhiziens et des rhizobiums favorisant une meilleure tolérance des espèces végétales sahéliennes face aux facteurs abiotiques comme le stress hydrique. La connaissance des mécanismes écophysologiques d'adaptation au stress hydrique des microorganismes symbiotiques, avec ou sans leurs plantes-hôtes, revêt ainsi une grande importance dans le choix des souches à sélectionner pour reconstituer le couvert végétal.



▲ Effet bénéfique de l'inoculation avec le champignon mycorhizien *Glomus aggregatum* sur des plants de jujubier (*Zizyphus mauritiana*) âgés de 4 mois en serre.

© A. Bâ



▲ Effet bénéfique de l'inoculation avec le champignon mycorhizien *Glomus aggregatum* sur des plants de jujubier (*Zizyphus mauritiana*) âgés de 8 mois. Jardin polyvalent d'Amally situé sur le tracé de la Grande Muraille Verte au Sénégal.

© A. Bâ



Pour plus d'informations : <http://senegal.ird.fr/la-recherche/tous-les-projets/environnement-et-ressources/lcm>

Des herbacées associées à des champignons mycorhiziens pour l'afforestation des sols salés

La salinisation des sols est un problème environnemental qui ne cesse de croître, particulièrement dans les zones arides et semi-arides. Environ 800 millions d'hectares de terres à travers le monde sont affectés par le sel.

Au Sénégal, environ 6% des terres sont affectés par la salinisation notamment en zone côtière, comme, par exemple, dans les basses vallées du Sine et du Saloum. Sur ces sols salés quasiment dénudés (appelés localement *tann*), se développent deux espèces de graminées halophytes (plantes qui poussent dans les milieux saumâtres ou salins) : *Sporobolus robustus* Kunth et *Leptochloa fusca* (L.) Stapf. Ces graminées, qui constituent un fourrage d'appoint important pour le bétail en saison sèche, sont associées à des champignons mycorhiziens à arbuscules et à des bactéries fixatrices d'azote. Ces symbioses leur donnent en partie la capacité de tolérer des teneurs en sel modérées.



▲ *Acacia seyal* au milieu d'un tapis herbacé de *Sporobolus robustus* sur un sol marqué par la salinité dans la région naturelle du Sine Saloum. Foundiougne, Région de Fatick, Sénégal.

© D. Diouf

Par ailleurs, ces graminées forment des touffes sur lesquelles se développent des essences forestières à usages multiples : *Acacia seyal* Del. et *Prosopis juliflora* (Swartz) DC. Ces herbacées établiraient donc un microenvironnement tellurique favorable à la germination et à l'établissement de ces arbustes sur des sols salés. Deux mécanismes non exclusifs agiraient : (i) une dépollution des sols par accumulation des sels et (ii) une stimulation d'une microflore adaptée qui renforcerait la tolérance des arbustes à la salinité. Une meilleure connaissance des communautés microbiennes symbiotiques dans ces associations « graminées/arbres » suivant le niveau de salinité et la saison permettrait de proposer des voies de **réhabilitation** par afforestation de zones salées en contrôlant l'introduction simultanée d'herbacées et de symbiotes microbiens.

Pour plus d'informations : <http://senegal.ird.fr/la-recherche/tous-les-projets/environnement-et-ressources/lcm>

Inoculation de sols avec des rhizobiums pour intensifier la production des cultures de niébé

En agriculture, la technique d'inoculation des sols par des microorganismes symbiotiques préalablement sélectionnés représente une forte opportunité pour augmenter la production agricole. Cette technique a été testée au Sénégal avec des rhizobiums sur la culture du niébé (*Vigna unguiculata*). Le niébé est une légumineuse alimentaire importante dans les

systèmes de culture à base de céréales-légumineuses du Sahel de par ses apports en protéines et autres éléments essentiels à l'équilibre nutritionnel des populations. L'objectif de l'inoculation est d'intensifier le processus de fixation d'azote atmosphérique par les symbioses microbiennes.

Le Laboratoire Commun de Microbiologie (UCAD/ISRA/IRD)* au Sénégal a mis en place un réseau de sites de recherche et de démonstration dans des communes rurales en partenariat avec les producteurs** afin de (i) mener des expériences en milieu réel, (ii) de diffuser la technique d'inoculation aux acteurs locaux et (iii) de créer des sites privilégiés d'échange et de partage de questionnements de recherche entre les chercheurs et les producteurs.

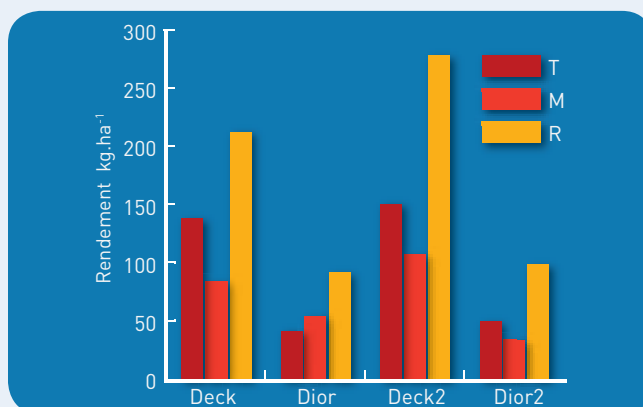
Une vaste campagne de prospection de la diversité naturelle des rhizobiums et des champignons mycorhiziens dans les champs de niébé (1999-2005) a montré une grande diversité microbienne déterminée par les conditions hydriques et le pH des sols. Des essais participatifs d'inoculation avec des souches microbiennes sélectionnées en fonction de leur répartition géographique ont été effectués sur le terrain, dans des champs de niébé, sous des pluviosités annuelles variant de 300 à 800 mm par an, sur différents types de sol (sableux, argileux) et selon diverses pratiques culturales. Ces essais ont permis d'enregistrer des effets positifs de l'inoculation de niébé notamment par les rhizobiums (cf. graphique ci-dessous) avec des augmentations des rendements en graines sèches de 40 à 170%. De plus, dans certaines conditions, une meilleure résistance aux stress hydriques et aux attaques parasitaires a été notée dans les parcelles où des rhizobiums avaient été introduits. La technologie a été par la suite adoptée par les agriculteurs, les agents d'encadrement et les représentants des organisations de producteurs.

Il est désormais nécessaire d'assurer la disponibilité d'un inoculum de qualité et performant, ce qui constitue actuellement un frein à la diffusion de la technologie. Une entreprise tente de se lancer dans ce défi en collaboration avec les associations de producteurs.

Pour plus d'informations : Neyra et al., 2012.

* Il regroupe l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, l'Institut de Recherche pour le Développement et l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles.

** Partenariat avec les organisations de producteurs agricoles, les Eaux et Forêt et l'Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural sous la houlette du Conseil National de Concertation et de Coopération des Ruraux.



▲ Effet de l'inoculation de niébé sur différents types de sol (Deck ou Dior). Ouarkhokh, Sénégal.

T. Sol non inoculé.

R. Sol inoculé avec une souche de rhizobium.

M. Sol inoculé avec un champignon endomycorhizien.

D'après Do Rego et al., 2015.

ASSOCIER ET FAIRE COLLABORER DES PLANTES

Un écosystème naturel tel que la savane présente une grande diversité de végétaux. Les plantes qui composent les savanes, qu'elles soient herbacées, arborées ou arbustives, sont certes en compétition entre elles pour l'utilisation des ressources, mais elles coexistent et s'entraident aussi, participant alors à la résilience de ces milieux. Ainsi, certaines plantes sont capables d'atteindre des ressources particulières et en font profiter d'autres plantes. L'exemple le plus représentatif est celui des légumineuses capables de fixer l'azote atmosphérique par symbiose avec un microorganisme. Cet azote, une fois fixé, est introduit dans le sol à travers la minéralisation des litières issues de ces plantes et profite alors à d'autres plantes.

Un autre exemple concerne la relation entre ligneux et herbacées dont les ressources prélevées en profondeur par les premiers peuvent être redistribuées aux seconds via les litières ou les racines.

Certaines pratiques agricoles, forestières ou d'élevage, s'inspirent de ces processus écologiques. Ainsi, de nombreuses parcelles agricoles présentent souvent plusieurs espèces cultivées : des céréales aux cycles de croissance différents, des légumineuses cultivées entre

des céréales, etc. On peut également citer les parcs agroforestiers très largement répandus dans les zones soudano-sahéliennes.

Associer des légumineuses à des céréales

Les associations légumineuses-céréales, via le processus de fixation d'azote atmosphérique, permettent une meilleure valorisation des ressources du milieu dans les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés par rapport aux cultures pures correspondantes. Cet effet positif réside dans le gain de rendement global par rapport à des cultures pures (monospécifiques) et dans l'amélioration significative et quasi-systématique de la teneur en protéines de la céréale, et ce quelle que soit sa proportion dans le mélange récolté.

Les associations sont également un moyen de réduire, dans certaines situations, la pression des adventices, maladies et ravageurs, souvent considérés comme des facteurs limitant la production agricole. Elles représentent ainsi une alternative intéressante à la lutte chimique qui est difficilement abordable d'un point de vue économique pour les agriculteurs et, surtout, extrêmement polluante.

→ ZOOM | Interactions entre les plantes : facilitation et compétition

Les plantes interagissent à travers l'effet qu'elles exercent sur les composantes abiotiques ou biotiques des écosystèmes. Lorsque la présence d'une espèce affecte positivement l'établissement, la croissance, la survie ou la reproduction d'une autre espèce, on parle de facilitation. Dans le cas contraire, on parle de compétition (Callaway, 2007).

Dans les milieux subissant de fortes contraintes abiotiques, comme c'est le cas des milieux secs, la facilitation joue un rôle important dans la structuration et le fonctionnement des écosystèmes (Bertness & Callaway, 1994). Elle peut s'opérer de différentes manières :

- via des mécanismes directs, lorsqu'une espèce modifie les conditions abiotiques du milieu d'une manière qui bénéficie à d'autres espèces : dans les milieux secs, la facilitation se fait souvent par une amélioration de l'accès à l'eau, ressource dont la faible disponibilité représente la principale contrainte au développement des plantes. Certaines plantes captent l'eau en profondeur (« ascenseur hydraulique ») et en rendent une partie disponible pour d'autres plantes aux systèmes racinaires moins profonds. Par l'ombrage qu'elles fournissent, certaines plantes peuvent également limiter l'évaporation et ainsi augmenter l'humidité du sol. La facilitation peut aussi s'opérer via d'autres ressources telles que les nutriments, comme c'est le cas pour les légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique et le rendent disponible aux autres plantes. Elle peut aussi résulter de l'atténuation d'une contrainte climatique défavorable ; c'est

le cas pour les plantes dont la température foliaire est abaissée en dessous du seuil létal par l'ombrage d'autres plantes ;

- par l'intermédiaire d'autres organismes vivants : certaines plantes, en développant des mécanismes pour repousser les herbivores, facilitent l'installation d'autres herbacées appréciées par les animaux. Des plantes attirent également les animaux pollinisateurs ou disperseurs de graines, favorisant ainsi la reproduction d'autres plantes. Parfois, la facilitation passe par des microorganismes du sol tels que les mycorhizes ;
- via un effet négatif sur un compétiteur commun.

Les différents mécanismes de facilitation et de compétition se combinent ou s'opposent. L'équilibre entre effets positifs et négatifs est complexe et dépend de l'espèce et de l'âge, tant de la plante facilitée que de la plante facilitatrice. En effet, l'effet positif d'une espèce sur les jeunes individus d'une autre espèce peut devenir négatif pour les adultes de cette même espèce. Dans les milieux à forte saisonnalité des précipitations, une espèce peut avoir une action positive sur la ressource en eau en saison sèche mais entrer en compétition pour la lumière en saison des pluies.

L'observation et la compréhension de ces mécanismes de facilitation sont à la base de nombreuses actions d'ingénierie écologique en zones sèches qui utilisent ces interactions pour augmenter la fourniture de services écosystémiques sur lesquels elles interviennent.

Les mélanges d'espèces ont aussi d'autres avantages comme la réduction de l'érosion des sols par une meilleure couverture et enracinement, l'amélioration de la résistance à la verse, la réduction des risques de lixiviation de nitrates ou encore la meilleure stabilité interannuelle des rendements. En outre, les associations culturales (systèmes de culture intercalaire) semblent très prometteuses pour développer une production alimentaire durable dans les contextes de ressources naturelles limitées, notamment l'eau, comme c'est le cas dans les régions sèches d'Afrique de l'Ouest.

→ EXEMPLE | Les associations légumineuses-céréales au Nord du Burkina Faso

Les associations légumineuses-céréales occupent une place importante dans les agrosystèmes de la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Des travaux récents réalisés au nord du Burkina Faso ont permis d'étudier les déterminants socioéconomiques de ces associations et les pratiques paysannes liées. Les associations les plus courantes sont « sorgho-niébé » et « mil-niébé ». Les objectifs de ces pratiques, tels que les agriculteurs l'indiquent, sont d'ordre culturel, alimentaire, nutritionnel et économique. Le choix de chacune des espèces ou des variétés en association, est essentiel pour l'optimisation de leur performance. Le choix d'associer les espèces dépend de leur complémentarité pour l'utilisation des sources d'azote ainsi que de leur complémentarité spatiale et temporelle pour l'utilisation de l'énergie lumineuse. En effet, en raison de la complémentarité entre espèces associées mais également de la plus forte compétitivité de la céréale pour l'utilisation de l'azote du sol et de la lumière, on peut faire l'hypothèse que les variétés de céréale à associer doivent avoir à la fois un système racinaire très compétitif pour l'utilisation de l'azote minéral du sol, une bonne tenue de tige, une architecture aérienne et une production de biomasse permettant la diffusion d'une quantité raisonnable de lumière au couvert dominé.

Pour plus d'informations : Zongo, 2013 ; Zongo *et al.*, à paraître.



▲ Association niébé-sorgho. Burkina Faso.
© F. Zongo

Les pratiques agroforestières

La savane est un système complexe dans lequel l'arbre joue un rôle essentiel (voir précédemment). L'arbre est également très présent dans les systèmes cultivés. On parle alors de systèmes agroforestiers.

Les espèces ligneuses ont une valeur utilitaire pour le ménage ou une valeur commerciale sur le marché local, régional ou, plus rarement, international (cas du karité ou de la gomme arabique par exemple). Elles participent à la diversification des revenus ou à la sécurisation des conditions de vie des populations. La conservation ou l'implantation des ligneux dans l'agrosystème aide, en outre, à la préservation des sols et du cycle des nutriments, augmente la biodiversité par rapport à des cultures annuelles pures, représente un stock de biomasse — et donc de carbone — dans l'écosystème et peut induire des conditions microclimatiques tempérant les fluctuations météorologiques. Ceci a conduit chercheurs et acteurs du développement à évaluer l'intérêt de promouvoir les pratiques agroforestières.

Les parcs arborés — qui constituent un type de système agroforestier — font partie, depuis plusieurs siècles, des stratégies adaptatives les plus anciennes des sociétés rurales d'Afrique subsaharienne. En effet, les agriculteurs défrichent depuis longtemps les savanes arborées pour les mettre en culture. Ce défrichage est sélectif afin de conserver les arbres utiles. Ces systèmes sont ensuite enrichis par l'introduction de nouvelles espèces ou par régénération naturelle des espèces présentes. Différents types de parcs agroforestiers se sont ainsi construits au fil du temps, comme les parcs à *Faidherbia albida* ou les parcs à karité.

Plusieurs tentatives ont eu lieu pour densifier les ligneux dans les champs cultivés. Cela n'est pas toujours évident. En effet, au-delà de certains seuils de densité du peuplement, la compétition souterraine pour l'eau et la lumière entre la culture et les arbres annule fréquemment les bénéfices liés à l'enrichissement du sol et à l'amélioration du microclimat (Ong & Leakey, 1999). Cependant, la régénération naturelle assistée des arbres et arbustes — une pratique très répandue dans les populations de la zone soudano-sahélienne — permet parfois, localement, une extension et une densification des ligneux dans les terroirs cultivés (Garrity *et al.*, 2010). Une extension des parcs arborés et une amélioration de leurs performances semblent donc possibles si elles se basent sur l'expérience des acteurs comme c'est le cas, par exemple, dans les projets de régénération naturelle assistée de la strate ligneuse (*cf. page suivante*).

→ ZOOM | La régénération naturelle assistée pour reconstituer des systèmes agroforestiers complexes

La régénération naturelle assistée (RNA) est une approche agroforestière dont le but est de provoquer ou de stimuler la régénération naturelle d'espèces ligneuses à buts multiples et/ou leur développement et leur intégration dans l'espace agricole (champ) pour qu'elles puissent augmenter le rendement total de cet espace. Elle constitue une pratique séculaire consistant à épargner et à entretenir dans la parcelle de culture, les régénérations naturelles spontanées à des densités désirées (Samaké *et al.*, 2011).

Les projets de RNA peuvent se concevoir de deux manières, soit sans clôture mais avec une réelle implication des populations locales comme au Niger (régions de Maradi et d'Aguié) (Larwanou *et al.*, 2006 ; Reij & Botoni, 2009 ; Reij, 2009), soit dans des périmètres protégés comme l'action menée par l'ONG newTree au Burkina Faso.

Pour densifier le couvert arboré au Burkina Faso, là où coexistent une exploitation intensive et une régénération naturelle très faible, l'ONG newTree a lancé depuis 2003 des projets de restauration du couvert végétal. Les partenaires impliqués dans le programme — producteurs, autorités administratives, etc. — signent un contrat et des procès-verbaux d'accords fonciers — documents incluant les droits coutumiers et les droits administratifs — pour chaque site. Une haie vive est plantée à l'intérieur de l'espace clôturé. Par la suite, des plans de gestion sont élaborés selon les besoins des partenaires afin de permettre une exploitation durable des surfaces restaurées. L'intégration des femmes dans les prises de décision en matière de gestion des sites mis en défens représente une étape décisive dans le processus.

Fin 2007, sur 225 ha de terres dégradées, plus de 135 000 arbres et arbustes ont été dénombrés (Mme Kaguembèga, *comm. pers.*, 2011). De plus, les mises en défens ont permis de conserver des espèces rares : *Boscia angustifolia*, *B. senegalensis*, *Maerua angolensis*, *M. crassifolia*, *Salvadora persica*, *Boswellia dalzielii*. Le bois-énergie et des coproduits tels que du fourrage, des pailles pour les toitures, des produits pour la médecine traditionnelle, etc., diversifient et augmentent les revenus des populations locales. Ces résultats montrent que la dégradation forestière n'est pas irréversible et que la mise en défens, si elle est acceptée et respectée par tous les partenaires, a un impact favorable sur la dynamique paysagère.

Toutefois, la principale difficulté de la RNA est de faire coexister les espaces forestiers accessibles à tous les agro-éleveurs et pasteurs transhumants. Ce droit de pâturage fait partie des droits d'usages coutumiers reconnus aux communautés rurales. Toutefois, dans les parcours normalement exploités par les pasteurs, le ligneux est considéré comme une ressource communautaire renouvelable au même titre que l'herbe.

Le niveau de connaissances concernant l'amélioration de la RNA et la biologie de la reproduction, très variable selon les espèces et les pays, doit être amélioré : phénologie, modes et distances de dissémination du pollen et des graines, conditions de conservation, prétraitement, inventaire et cartographie des peuplements semenciers, variabilité génétique, étude de facteurs favorisant la multiplication végétative, conditions optimales de domestication, étude de la capacité optimale de charge, techniques de gestion des cultures de ligneux fourragers, impact des émondages, élagages, étêtages et des tailles en parapluie sur la survie des espèces, etc.

Au sud du Sahel, les parcs à *Faidherbia albida* représentent l'exemple le plus abouti d'intégration agro-sylvo-pastorale (Peltier, 1996). En effet, cet arbre présente un ensemble de caractéristiques très favorables à l'utilisation agroforestière : un cycle phénologique inversé, une fixation de l'azote atmosphérique qui peut enrichir l'agrosystème, un puisage profond de l'eau et une certaine valeur fourragère de son feuillage (*cf. page suivante*).

Au Sahel, les arbustes, tels que *Guiera senegalensis*, *Piliostigma thonningii* ou *Piliostigma reticulatum*, dominant encore plus largement, souvent en peuplements monospécifiques peu denses, dans les champs de mil, de sorgho ou au sein de paysages très ouverts. Leur rôle socioéconomique et agroforestier est substantiel et leur utilisation semble localement importante dans les pratiques traditionnelles de restauration des sols (Kizito *et al.*, 2007 ; Lahmar *et al.*, 2012 ; Wezel *et al.*, 2000, *cf. page suivante*). Plus au sud, les arbres, comme le karité (*Vitellaria paradoxa*), sont typiques des savanes soudaniennes à guinéennes

sur toute la bande allant du Sénégal jusqu'au bord du Soudan et de l'Éthiopie (Teklehaimanot, 2004). Le karité fournit des fruits comestibles et de l'huile de cuisine consommés localement. Il produit aussi le fameux beurre de karité qui est de plus en plus exporté à l'international (Pelissier, 1980).



▲ Fruits du karité (*Vitellaria paradoxa*). Bénin.
M. Donnat © IRD

Enfin, les arbres de la zone subsaharienne ont aussi une fonction importante dans l'appropriation foncière. Quelques études ont cherché à mieux appréhender quels en sont les acteurs et leur niveau de décision pour la gestion des parcs (Asse & Lassoie, 2011). Les dynamiques de transformation des sociétés rurales des zones tropicales sèches sont puissantes : elles sont à la fois mues par des contraintes climatiques fortes dans un contexte de croissance démographique élevée, une modification des échanges rural-urbain et des mutations des politiques économiques et environnementales. Comprendre la manière dont ces dynamiques de transformation sociale interagissent avec celles des parcs agroforestiers demeure un enjeu important pour la recherche et serait un atout certain pour l'élaboration de politiques de gestion de ces espaces.

Conserver des arbustes natifs à usages multiples dans les champs cultivés

Dans la zone semi-aride d'Afrique de l'Ouest, les champs paysans sont bien souvent peuplés d'arbustes — particulièrement *Piliostigma reticulatum* et *Guiera senegalensis* —, qui représentent une ressource verte non négligeable pendant les longs mois de sécheresse.

On retrouve ces deux espèces dans les paysages soudano-sahéliens et soudaniens de la côte atlantique (Mauritanie/Sénégal) jusqu'à celle de la mer Rouge (Soudan/Érythrée). Ces arbustes forment des peuplements purs ou mélangés, pouvant atteindre des densités de l'ordre de 2 000 pieds à l'hectare quand les conditions de sol sont favorables. Toutefois, on les trouve aussi sur des sols pauvres, cuirassés et dégradés, sous forme de touffes multi-tiges dont la hauteur et le rayon du houppier avoisinent 1,5 mètre. En bordure des champs, *P. reticulatum*, en particulier, se présente souvent sous la forme d'un arbuste, voire d'un arbre de plusieurs mètres de hauteur.

Ces deux espèces, aux feuillages riches en tanins, attirent peu le bétail et montrent une certaine résistance aux feux de brousse. Elles se propagent aisément par graines, drageons, marcottes terrestres (*G. senegalensis*) et par rejets de souche recépée. Les animaux ayant consommé les gousses de *P. reticulatum* contribuent aussi à sa dissémination.

Les paysans connaissent bien ces arbustes. Ils en font de nombreux usages allant de la médecine traditionnelle à l'artisanat et à divers usages domestiques et, dans certaines régions, ils leur accordent aussi une valeur culturelle. Malgré cela, les paysans ne participent ni directement, ni volontairement, à la propagation

→ ZOOM | *Faidherbia albida*, une essence agroforestière aux multiples atouts

Faidherbia albida est une essence fixatrice d'azote (de la famille des Légumineuses) qui est traditionnellement bien implantée dans le système d'exploitation agricole vivrière de la zone soudano-sahélienne en Afrique subsaharienne. Cette essence présente un intérêt non seulement pour la production de bois et de fourrage de contre-saison d'excellente qualité, mais aussi pour son effet bénéfique sur les cultures associées, qu'elles soient vivrières (céréales) ou d'exportation comme le coton. Cet effet peut être attribué à trois caractéristiques de l'arbre :

- *F. albida* présente un cycle phénologique inversé (feuillaison en saison sèche, défoliation en saison des pluies) qui présente le double avantage de fournir un fourrage additionnel dans des périodes de soudure et de limiter la compétition pour la lumière, les ressources en eau et en nutriments avec les cultures vivrières au moment de sa croissance et de sa maturation. Cette phénologie en fait aussi un refuge d'ombrage pour le bétail en pleine saison sèche ;
- sa structure racinaire en forme de pivot peut descendre à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, ce qui lui permet un puisage profond de l'eau, qui entre alors peu en compétition avec celui des espèces herbacées ;
- sa capacité à établir des symbioses avec des bactéries fixatrices d'azote lui permet de participer à la restauration de la fertilité du sol de l'agrosystème. Elle se traduit par la formation, au niveau des racines, de nodosités dans lesquelles les bactéries transforment l'azote atmosphérique en ammonium assimilable par les plantes.



▲ *Faidherbia albida* en bas fond dans un champ de sorgho au sud-est du Niger.

© B.H.A. Issoufou

de ces deux espèces par plantation ou par semis. En revanche, ils les conservent spontanément dès qu'elles apparaissent dans leurs champs cultivés.

Lorsque les paysans commencent à préparer leurs champs pour l'installation des cultures — au début de la saison humide, voire bien avant selon les localités ou les circonstances —, les arbustes sont coupés au ras du sol. Les tiges et branches ainsi coupées sont utilisées comme bois de feu et les résidus sont brûlés. Il est également possible d'utiliser les branches coupées des arbustes pour former un mulch (ou paillis). Le semis de la culture, généralement une céréale, se fait alors directement à

travers le mulch à l'aide d'un outil à main. À la montée de la céréale, les grosses tiges, complètement effeuillées, sont alors ramassées pour servir de bois de feu.

Ainsi, le brûlis, fréquent dans les systèmes de culture ouest-africains, s'apparente à un apport direct d'éléments minéraux au sol, hormis l'azote qui se volatilise au cours de la combustion. Par contre, la gestion par le mulch impacte les processus écologiques du sol via la décomposition des feuilles et des branches, permettant une conservation des éléments nutritifs tels que l'azote et une alimentation du stock de matière organique dans le sol.

Les résultats des recherches développées sur ces deux espèces arbustives, au Burkina Faso et au Sénégal (cf. zoom page suivante), montrent qu'elles procurent d'énormes services ou facilitations aux plantes qui se développent dans leur voisinage immédiat (nutritions hydrique et minérale, voire protection). En outre, ces espèces améliorent les propriétés du sol et entretiennent son activité biologique, réduisent les risques pour l'environnement (stockage de carbone, réduction du ruissellement et de l'érosion, etc.), ce qui justifie amplement l'intérêt d'une gestion écologique de ces arbustes.



▲ Au premier plan, un arbuste de *Piliostigma reticulatum* à gauche et des arbustes de *Guiera senegalensis* à droite. Kaya, Burkina Faso.
© R. Lahmar



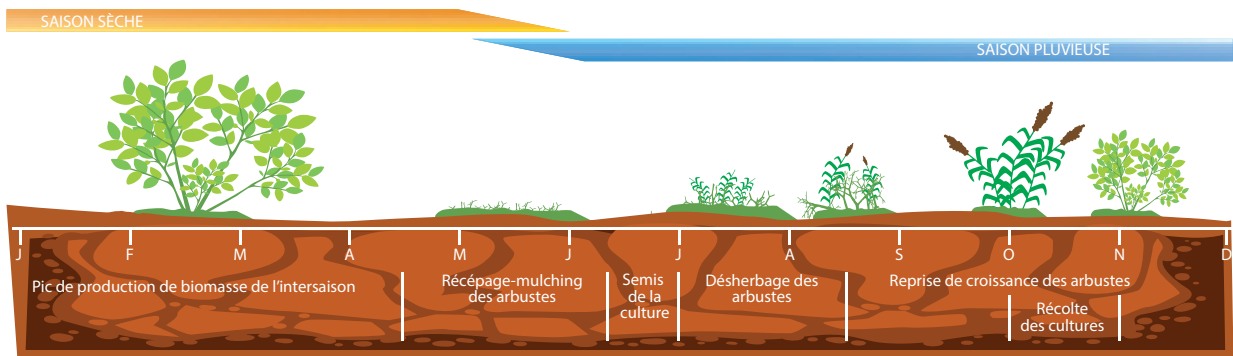
▲ Arbustes de *P. reticulatum* dans un champ paysan. Il s'agit de repousses de l'année. Yilou, Burkina Faso.
© R. Lahmar



▲ Coupe et brûlis de touffes de *G. senegalensis* à l'entrée de la saison de culture. Maradi, Niger.
© R. Lahmar



▲ Coupe des touffes et mulching avec les branches de *P. reticulatum* à l'entrée de la saison de culture. Yilou, Burkina Faso.
© R. Lahmar



▲ **Gestion des arbustes natifs dans les systèmes de culture de la zone semi-aride d'Afrique de l'Ouest.**
Exemple de *Piliostigma reticulatum*, Yilou, Burkina Faso.
Saison sèche : *P. reticulatum* croît, il réduit l'érosion et intercepte les poussières.

Saison des pluies : il est recépé au démarrage de la saison pour faire place à la culture principale. Il est désherbé durant la saison des pluies. Les repousses permettent ensuite à l'arbuste de se reformer.
D'après Lahmar *et al.*, 2012.

→ EXEMPLE | Deux projets de recherche sur les arbustes natifs dans les champs cultivés en zone soudano-sahélienne

Burkina Faso : des recherches sur l'association *Piliostigma reticulatum* - sorgho

Le projet **Crop-NEWS*** (*Crop-news systems for improved soil and water conservation in the africa drylands*) est un dispositif expérimental à long terme dédié aux recherches sur l'association d'arbustes natifs (*P. reticulatum*) et de cultures annuelles (sorgho) au Burkina Faso. Ce dispositif est localisé sur le campus de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) à Kamboinsé (dispositif piloté par le Cirad et 2iE). On y teste la combinaison de deux facteurs — densité des arbustes et travail du sol — répétée quatre fois sur des parcelles de dimensions comparables à celles des parcelles paysannes (13,6 m x 20 m). Quatre densités d'arbustes sont testées — 0, 500, 1 000 et 2 000 touffes/ha — proches de celles observées localement en milieu paysan. Les types de travail du sol expérimentés sont le semis direct à la daba (houe traditionnelle) écarté de 0,8 m x 0,8 m ou le *zaï* (cf. p. 35) placé aussi à 0,8 x 0,8 m et en quinconce. Les résidus du sorgho sont quantifiés et maintenus chaque année à poids égal sur toutes les parcelles. *P. reticulatum* a été semé en pépinière en juin 2012 et transplanté dans le dispositif en août 2012. Chaque année, sont suivis et mesurés :

- le développement et la production de la biomasse et de grains de sorgho ;
- l'eau du sol à une profondeur de 3 mètres ;
- le développement racinaire du sorgho et de *P. reticulatum* en lien avec la gestion appliquée à l'arbuste ;
- après chaque récolte, des échantillons de sol sont prélevés et analysés selon un protocole pluriannuel prédéfini ;
- de nombreuses autres mesures et tests sont réalisés en fonction des besoins, comme, par exemple, la vitesse de dégradation du mulch issu de *P. reticulatum*.

Ce dispositif permet en particulier de vérifier l'hypothèse selon laquelle ces agrosystèmes sont à même d'opérer une aggradation à long terme — ou restauration — de sols dégradés, un enjeu important en Afrique tropicale.

Pour plus d'informations : www.wassa-eu.org

* Quatre projets internationaux y participent : *Agroecology-based aggradation-conservation agriculture* (ABACO), *Woody Amendments for Soudano-Sahelian Agriculture* (WASSA), Recherche de compromis entre productions et services écosystémiques fournis par les systèmes agroforestiers (SAFSE), *CONNecting knowledge, scales and actors; An integrated framework for adaptive organic resource management targeting soil aggradation and agroecosystems' resilience in Sub-Saharan Africa* (ConneSSA, <https://connessa.uni-hohenheim.de>).

Sénégal : mieux comprendre le fonctionnement biologique de l'association arbuste-céréale

Dans le cadre de collaborations internationales*, des dispositifs expérimentaux ont été implantés au Sénégal depuis le milieu des années 2000. Ils intègrent des arbustes locaux dans le système cultivé : *Guiera senegalensis* dans la région de Thiès et *Piliostigma reticulatum* dans la région de Nioro.

Les travaux ont montré la capacité de ces deux arbustes à redistribuer l'eau dans le sol au profit des horizons de surface (phénomène « d'ascenseur hydraulique ») et à générer des îlots de fertilité. Ainsi, leur association avec des céréales permet l'amélioration des rendements de la culture vivrière.

Les recherches se poursuivent afin d'identifier les processus écologiques sous-jacents. L'hypothèse est que la présence des arbustes permet la création de niches écologiques propices au développement de communautés microbiennes impliquées dans la fourniture d'éléments nutritifs exploités par la culture associée, favorisant ainsi sa croissance. Les objectifs de ces recherches sont les suivantes :

- déterminer les effets du phénomène d'ascenseur hydraulique sur les communautés microbiennes et les fonctions associées à ces microorganismes ;
- déterminer l'impact de l'association culturale sur les communautés de nématodes et sur la structure des **réseaux trophiques** au sein du sol ;
- déterminer si les populations microbiennes bénéfiques à la croissance des plantes présentes dans le sol à proximité des racines des arbustes colonisent la culture associée ;
- identifier la diversité des champignons mycorrhiziens et déterminer leurs impacts sur les flux d'eau et de nutriments ;
- identifier et isoler les microorganismes capables de promouvoir la croissance de la céréale.

Pour plus d'informations : www.oardc.ohio-state.edu/senegal-pire/t01_pageview3/Home.htm

* Projet PIRE/NSF, *Partnerships for International Research and Education/ Hydrologic Redistribution and Rhizosphere Biology of Resource Islands in Degraded Agroecosystems of the Sahel: A PIRE in Tropical Microbial Ecology*



◀ Flore du Sénégal : *Faidherbia albida*.

J.-J. Lemasson © IRD



▲ Parcelle agroforestière à l'extrême nord du Cameroun à Figuil (pendant la saison des pluies).

© R. Bellefontaine

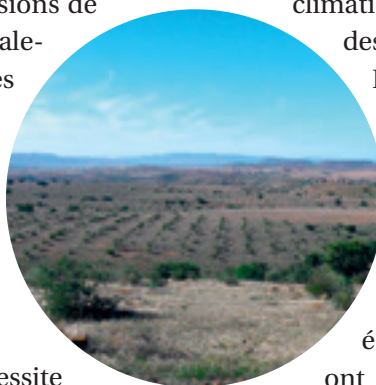
▼ Arganeraie de Tifadine (près de Tiznit, sud du Maroc) : vue d'un reboisement de 3 ans, sans clôture, mais protégé par les populations locales qui en avaient fait la demande aux Eaux et Forêts.

© R. Bellefontaine

Restauration écologique des forêts tropicales sèches

Les conditions environnementales favorables aux forêts tropicales sèches le sont également et souvent aux activités humaines, de par leur climat et la relative richesse chimique de leur sol. Ces forêts ont donc été soumises depuis plusieurs siècles à d'intenses pressions de dégradation et de déforestation, généralement pour la conversion des forêts en terres agricoles (Janzen, 1988 ; Miles *et al.*, 2006). Les préoccupations environnementales croissantes, associées au déclin des activités agricoles dans certaines zones, ont conduit à une demande de restauration écologique de ces forêts.

Le succès des actions de restauration nécessite une connaissance fine de l'écologie de ces forêts tropicales sèches. Cependant, ces écosystèmes ont fait l'objet de bien moins d'études que les forêts tempérées et les forêts tropicales humides sur lesquelles les mécanismes de régénération des forêts tropicales sèches ont bien trop souvent été calqués (Vieira & Scariot, 2006). Les espaces arborés des régions sèches (savanes, forêts, jachères, etc.) ont pourtant des processus de régénération qui leurs sont propres, tels que l'importance de la multiplication



végétative, l'importance relative de la dispersion du pollen et des graines ou des fruits par le vent et les animaux, la phénologie de production des graines dépendant le plus souvent de la saisonnalité des pluies, ainsi que des barrières à la régénération (feux précoces violents ou tardifs très nocifs d'origine anthropique, conditions climatiques contraignantes, compétition avec des herbacées de pâturage introduites). Il convient de les prendre en compte pour mener à bien des actions de restauration.

Une fois que les attentes sociétales vis-à-vis d'un projet de restauration (restauration des sols dégradés, production de bois, production de services écosystémiques, biodiversité et habitats...) ont été identifiées, l'étape-clé de la restauration écologique réside dans la compréhension des mécanismes de dégradation et des dynamiques de changement d'usage des terres. La formulation d'un projet de restauration et l'identification des actions adaptées aux contraintes et aux potentialités locales constituent également des étapes indispensables avec l'incontournable participation active des populations et des institutions concernées (Griscom & Ashton, 2011).

La restauration écologique des espaces arborés des régions sèches peut être passive lorsque le milieu semble suffisamment résilient et dispose de sources de régénération, que ce soit dans les forêts épargnées par la déforestation, les savanes arborées ou les arbres hors forêt (arbres des pâturages, des haies vives ou de corridors des rives de cours d'eau). Lever les facteurs de dégradation peut alors s'avérer suffisant pour relancer le processus naturel de densification du couvert ligneux. Cette densification doit alors être corrélée à une mise en défens contre les troupeaux locaux ou transhumants par des clôtures ou, plus rarement, par une acceptation ferme et rigoureuse des populations riveraines en échange d'avantages tels que l'organisation de marchés ruraux de bois de feu (Bellefontaine, 1999 ; Bellefontaine *et al.*, 2000) ou la récolte gratuite des fruits (Achour *et al.*, 2013). Rares sont cependant les mises en défens respectées pendant plus de dix années.

Dans les zones à forte contrainte hydrique, thermique ou autre (zones arides et semi-arides, zones à cyclones, zones boréales, etc.), l'aptitude de certains ligneux à se régénérer naturellement par multiplication végétative (induction de drageons, marcottes terrestres, boutures en milieu ripicole) et l'induction de méthodes artificielles très peu coûteuses (blessures de racines superficielles, bouturage de segments de racine, marcottage aérien) ou à coûts relativement peu élevés (bouturage de fragments de tiges ou de branches sous châssis rustique, greffage) peuvent représenter une technique de restauration intéressante des forêts (Bellefontaine *et al.*, 2005 ; Harivel *et al.*, 2006 ; Meunier *et al.*, 2008 ; Belem *et al.*, 2008 ; Morin *et al.*, 2010 ; Noubissié-Tchiagam *et al.*, 2011 ; Zida *et al.*, 2014).

La restauration écologique des espaces arborés des régions sèches peut être active quand le potentiel de régénération est trop faible ou que les sols sont fortement dégradés. Il peut alors être nécessaire d'avoir recours à la plantation pour favoriser la restauration active (Griscom & Ashton, 2011). Par leur présence, les ligneux plantés peuvent ensuite rendre les conditions environnementales plus favorables pour la régénération naturelle en atténuant le risque de stress hydrique en milieu ouvert ou en améliorant la fertilité des sols (Padilla & Pugnaire, 2006). Après quelques années, ils pourront également attirer les animaux disperseurs de graines. Le choix des espèces est alors particulièrement important et doit être adapté aux conditions abiotiques et biotiques locales.

Historiquement, les actions de restauration active s'appuyaient surtout sur des plantations en plein et en monoculture d'espèces exotiques choisies pour leur capacité à s'installer rapidement (Parrotta *et al.*, 1997). Cependant, ces plantations sont d'une faible valeur en termes de biodiversité et peuvent, dans certains cas, présenter un risque d'invasion des milieux environnants par les espèces exotiques invasives. Aussi, l'utilisation d'espèces locales et la plantation d'espèces en mélange sont de plus en plus favorisées pour la restauration. De plus, la technique de restauration par nucléation, qui a donné des résultats encourageants en zones méditerranéennes et tropicales humides (Corbin & Holl, 2012 ; Rey Banayas *et al.*, 2008), pourrait être avantageusement utilisée dans les zones sèches. Cette technique consiste à planter des ligneux de manière isolée ou sous forme de petits lots conduisant à la formation de noyaux de régénération qui vont petit à petit se rejoindre. Celle-ci présente une alternative économiquement intéressante et écologiquement viable à la plantation en plein.



◀ *Sclerocarya birrea* : induction de drageons de 1,8 m de haut 6 mois après la blessure de la racine de 4 cm de diamètre à Figuil, nord-Cameroun.
© R. Bellefontaine

◀ Châssis rustique de propagation.
© Q. Meunier

→ ZOOM | Reproduction sexuée et multiplication végétative à faible coût

Le voyageur qui, en Afrique, traverse les zones guinéennes, soudano-guinéennes, soudano-sahéliennes et sahéliennes, du sud au nord, passe de la forêt dense sèche à la forêt claire, puis à la savane, à la steppe et aux sables du désert avec une végétation rare et située dans les dédales de fleuves fossiles ou de rivières temporaires. Selon un axe sud-nord, on passe d'une régénération par graines dominante à une régénération presque exclusivement par rejets (de souche), par drageons (de racines) ou par marcottes (de rejets dominés et branches traînantes), au fur et à mesure que le caractère aride du sol augmente (Catinot, 1994). En effet, à la limite de leur aire de répartition, les espèces ligneuses perdent progressivement leur potentiel de reproduction séminale. La floraison, la nouaison et la fructification se raréfient à mesure que les conditions ambiantes deviennent défavorables.

Fructifications abondantes, potentiels de dispersion efficaces et modes de multiplication végétative variés conditionnent la (re)conquête ligneuse de territoires. Les reproductions sexuée et asexuée (végétative) sont indissociables et doivent être toutes les deux favorisées par les forestiers des zones arides et semi-arides :

- La reproduction sexuée est vitale pour assurer la variabilité génétique des espèces ligneuses et permet aux plantes de s'adapter assez rapidement aux changements environnementaux. Dans les régions arides et semi-arides, la reproduction par graines ne parvient pas à maintenir une densité suffisante de ligneux, car de nombreuses graines meurent lors de la longue saison sèche suivante, à cause des feux et/ou du surpâturage. De plus, la croissance démographique et l'augmentation du cheptel dans certaines régions entraînent la mutilation régulière des ligneux de toute taille, ce qui réduit leur production de graines, leur vitalité ou les condamne à plus ou moins brève échéance. Les mises en défens après plantation ou exploitation du bois sont longues et rarement respectées dans le cas d'un mode de traitement de la forêt basé sur le semis naturel ou artificiel (semis direct) et les saisons sèches successives déciment les jeunes plants durant les trois premières années.

- La multiplication végétative peut être naturelle ou artificielle. Naturelle, ce mode de reproduction asexué se fait par totipotence, à partir de certains des tissus ou des organes sur place (rejets de souche, rejets basaux, gourmands, réitérats) ou à quelques distances de l'arbre-mère (drageonnage, marcottage terrestre de branches en contact avec le sol, bouturage de fragments de branches tombés sur des sédiments frais ou emportés par une crue). Artificielle, la multiplication végétative fait alors appel à l'enracinement d'axes aériens (marcottage aérien), à l'induction de drageons par blessure des racines superficielles, au bouturage de segments de racines, au greffage. Ces techniques anciennes sont peu utilisées dans les pays développés, détrônées par la culture *in vitro* et l'embryogenèse somatique. Elles sont souvent méconnues par les forestiers africains, à l'exception des boutures de fragments de branches et des rejets de souche. La multiplication végétative produit des individus génétiquement identiques à la plante-mère : les clones. Elle a pour objectif principal de multiplier des arbres remarquables en nombre suffisant et permet ainsi la domestication d'espèces ligneuses à usages multiples que le paysan souhaite propager dans ses champs.

La multiplication végétative à faible coût (MVfc) pour les zones arides et semi-arides des pays en développement fait appel à des techniques économiques, rustiques et simples à comprendre par les populations rurales.

Ces techniques de MVfc mettent à la disposition des forestiers et des populations rurales des plants à croissance plus rapide. Ainsi, comparée au semis, la MVfc permet de réduire le temps nécessaire pour atteindre la maturité, notamment pour les espèces dioïques pour qui les organes apparaissent 5 à 20 ans après la plantation selon les espèces. De plus, les plants femelles sont majoritairement recherchés dans les plantations fruitières. Un gain économique important en production fruitière peut alors être obtenu si l'on peut déterminer précocement le sexe des plants en pépinière, voire dès le stade des graines. Les marqueurs moléculaires permettent aujourd'hui d'identifier précocement le sexe.

En Afrique, à ce jour, rares sont les ligneux domestiqués, à l'exception des fruitiers commerciaux et de l'olivier. Des efforts pour étudier la variabilité génétique et la multiplication végétative sont en cours pour diverses espèces :

- en Afrique du Nord : arganier (*Argania spinosa* L. Skeels), pistachier (*Pistacia vera* L.), caroubier (*Ceratonia siliqua* L.) ;
- au sud du Sahara : baobab (*Adansonia digitata*), Jujubier (*Ziziphus mauritiana*), dattier du désert (*Balanites aegyptiaca*), néré (*Parkia biglobosa*), karité (*Butyrospermum parkii*), marula (*Sclerocarya birrea*), tamarinier (*Tamarindus indica*) ;
- plus au sud encore : *Ricnodendron heudelotii*, safoutier (*Dacryoides edulis*), manguier sauvage (*Irvingia gabonensis*), *I. wombolu*, caïmite africaine (*Chrysophyllum albidum*), *Uapaca kirkiana*, etc.

Pour plus d'informations : Bationo *et al.*, 2005 ; Belem *et al.*, 2008 ; Bellefontaine, 2005 ; Bellefontaine & Malagnoux, 2008 ; Harfouche *et al.*, 2012 ; Harivel *et al.*, 2006 ; Meunier *et al.*, 2008 ; Morin *et al.*, 2010 ; Noubissié-Tchiagam *et al.*, 2011 ; Zida *et al.*, 2014.

▼ Quatre mois après le marcottage aérien, les racines d'arganier sont apparentes (après enlèvement de la feuille plastique entourant la sphaigne).



▼ Cette marcotte est ensuite replantée dans un substrat adéquat et protégée du vent et du soleil. On peut ensuite prélever des boutures semi-ligneuses après quelques mois.



→ ZOOM | Des graines de qualité et des plants aux systèmes racinaires vigoureux et équilibrés pour des reboisements réussis

La faculté germinative d'un lot de graines d'une espèce forestière dépend des conditions de récolte et de conservation des semences et des caractéristiques du semis, y compris les prétraitements. Or, aujourd'hui, en Afrique dans les zones semi-arides, si le processus de conservation et les conditions de semis sont, en général, de mieux en mieux connus, il n'en va pas de même pour les conditions de récolte, de dépulpage, de décorticage, et de séchage des graines, encore trop rarement précisées. L'importante variabilité de germination des graines qui existe entre les semences selon leur origine, est due à un état de dormance déterminée par la maturité des fruits, au génotype de la plante et aux conditions de leur stockage. Dans ce cas, une graine, bien que placée dans les conditions favorables à la germination, est inapte à germer. Il est alors nécessaire de prétraiter les graines pour les rendre capables de germer. Cela est fréquent dans les zones à longue saison sèche, où toutes les conditions optimales de germination (humidité, température, oxygène, lumière) sont rarement présentes simultanément. Le prétraitement d'une graine permet de lever la dormance par des traitements mécaniques, chimiques, physiques, physiologiques ou biologiques. Celui-ci est de durée très différente pour une même espèce, d'un lot à l'autre et même d'un semencier à l'autre. Les prétraitements doivent surtout être appliqués aux graines montrant une dormance profonde et qui ont été conservées dans de bonnes conditions.

Les plants doivent également être élevés dans de bonnes conditions. Des techniques utilisant des sachets en polyéthylène avec ou sans fond, des mottes précontraintes à base d'argile, etc., sont toujours appliquées bien qu'elles soient obsolètes. Or des malformations racinaires — chignons, baïonnettes, crosses, etc. — entraînent des mortalités importantes et des croissances insuffisantes des plants. Ces racines, même coupées, ne se développent pas correctement et le plant est condamné. Les déformations des racines perturbent pendant des années le fonctionnement physiologique et le bon développement racinaire, tous deux nécessaires à l'exploitation des ressources hydriques et minérales du sol. Ces déformations sont particulièrement préjudiciables en zones semi-arides où les espèces ligneuses ont développé une stratégie d'adaptation à la sécheresse en privilégiant le développement initial d'un système racinaire puissant, extensif et profond, prioritaire par rapport au développement des parties aériennes de la plante. Toute atteinte au bon développement de ce système racinaire affecte les capacités de survie de la plante dès la première saison sèche.

Pour produire des plants dotés d'un enracinement de qualité, il faut privilégier des supports de plantation — tels que les godets individuels anti-chignon, hors sol à fond grillagé à mailles larges —, un substrat cohérent, adapté localement et réalisé avec les matériaux locaux disponibles, une nutrition hydrique et minérale adaptée aux conditions climatiques locales, l'introduction de symbiotes bactériens ou fongiques. La formation des pépiniéristes à ces pratiques nouvelles est alors essentielle.

Pour plus d'informations : Bellefontaine *et al.*, 2012 ; Le Bouler *et al.*, 2012.



◀ Un arganier non sélectionné mais bouturé, élevé hors sol, en portoir alvéolé de 20 cm de profondeur favorisant l'autocernage et la ramification des racines.

© R. Bellefontaine



◀ Plant élevé à 30 cm au-dessus du sol (« hors sol ») dans des conteneurs.

© R. Bellefontaine



◀ Ce type de conteneur permet de diriger toutes les racines, sans chignon, vers le fond où elles se nécrosent au contact de l'air et forment de nouvelles racines latérales à l'intérieur du conteneur, rendant ainsi le système racinaire très performant dès que le plant est mis en place.

© R. Bellefontaine

L'agrobiodiversité : un réservoir de diversité pour l'avenir

Aujourd'hui, la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale repose principalement et uniquement sur 12 espèces de céréales et 23 espèces de légumes (Altieri, 1999) alors que plus de 7000 plantes sont cultivées ou collectées à l'état sauvage à travers le monde pour l'alimentation. Or, l'intensification de quelques espèces et variétés majeures ne suffit plus pour répondre aux besoins d'une population croissante et d'un environnement de plus en plus variable et difficile à maîtriser. Seule la valorisation d'espèces et de variétés locales — aujourd'hui sous-exploitées — permettra de

répondre de façon durable aux nouvelles conditions sociétales et climatiques. Les conservations *ex situ* et *in situ* des espèces cultivées, des espèces apparentées ainsi que des savoirs locaux et des pratiques agricoles associées représentent l'assurance d'une résilience face aux changements globaux.

L'agriculture familiale s'appuie sur une grande diversité d'espèces et de variétés cultivées avec tous les savoirs et pratiques agricoles associés à cette agrobiodiversité. Par exemple, l'agrosystème des *Duupa* du nord-Cameroun repose sur 84 espèces végétales cultivées ou protégées dans les champs (Garine, 1995).

→ ZOOM | Valoriser la diversité ancienne des plantes cultivées : le cas du fonio

Un grand nombre d'espèces cultivées ont été négligées, avec pas ou peu de recherche ou d'actions de promotion, ou encore sous-utilisées. Ces espèces sont produites localement et présentent ainsi une bonne adaptation à leur zone de culture et souvent une valeur culturelle importante. Elles contribuent à la sécurité alimentaire en étant facilement ou gratuitement accessibles aux populations, tout en produisant de substantiels revenus. Le fonio (*Digitaria exilis*) est l'une d'entre elle.

Qualifié de « trésor » par Vodouhe *et al.* (2007), le fonio est une graine régulièrement consommée par plusieurs millions de personnes dans une région s'étendant du Sénégal au lac Tchad. Longtemps considéré comme une céréale marginale, le fonio connaît aujourd'hui un regain d'intérêt lié au développement des technologies post-récolte et à la mise au point de nouveaux produits pour des marchés urbains africains et internationaux. Mais au-delà de cet intérêt, la production du fonio est également stratégique dans un contexte d'insécurité alimentaire. En effet, cette céréale, en arrivant à maturité avant les autres céréales, joue un rôle fondamental dans la gestion de la soudure alimentaire pour les millions de producteurs et de consommateurs ruraux. De plus, elle est très nutritive grâce à ses fortes teneurs en acides aminés soufrés, méthionine et cystéine (Jideani, 1990). Cette espèce génère en outre des revenus supplémentaires pour les agriculteurs ruraux et les femmes. Selon les années, le prix d'un kilo de fonio peut atteindre 1,5 à 2 fois celui d'un kilo de riz.

Adapté à la sécheresse et aux sols pauvres et peu fertiles, le fonio est aujourd'hui l'objet de programmes de recherche nationaux et internationaux pour développer sa culture.

Ainsi, le projet ARCAD* (*Agropolis Resource Centre for Crop Conservation, Adaptation and Diversity*) vise à constituer une plateforme ouverte et multifonction dédiée à la mise en place et à l'utilisation optimisée de l'agrobiodiversité dans les zones méditerranéennes et tropicales. Le fonio y fait l'objet d'une attention particulière dans le cadre du sous-projet « Céréales en Afrique » (riz africain, mil, sorgho, blé dur et fonio) afin d'étudier sa diversité et son potentiel. Initialement centrés sur la Guinée, les développements méthodologiques pluridisciplinaires ont été partagés dans le cadre de projets nationaux de caractérisation de la diversité génétique du fonio (Niger, Sénégal) favorisant ainsi la création d'un réseau de recherche pluridisciplinaire pérenne sur cette céréale et le développement d'une conservation et d'une utilisation durable de ses ressources génétiques.

* Plus d'informations sur le projet ARCAD : www.arcad-project.org



▲ Récolte du Fonio en Guinée.

© A. Barnaud

À la diversité des espèces elles-mêmes, s'ajoute la diversité des variétés — c.à.d. des variétés locales ou paysannes nommées et gérées par les agriculteurs. Elles ne sont pas nécessairement distinctes, homogènes et stables comme peuvent l'être les variétés commerciales. Les variétés locales sont d'autant plus importantes que leur diversité génétique est non seulement élevée mais aussi adaptée aux conditions locales (Mercer & Wainwright, 2012). La diversité génétique au sein d'une espèce se traduit en potentiel adaptatif, la diversité des variétés représente

l'assurance que l'espèce pourra s'adapter à des nouvelles conditions et à des nouveaux besoins (Ortiz, 2011). Ces capacités d'adaptation représentent autant de capacités d'améliorations génétiques potentielles face aux conditions environnementales futures.

La diversité génétique élevée et adaptée aux conditions locales des plantes cultivées localement résulte de pratiques agricoles et de sélection variétale par les agriculteurs (cas du mil ou du fonio par exemple, cf. ci-dessous).

→ ZOOM | Quelles adaptations des plantes et des sociétés sont possibles ?

Lors du processus de domestication, les hommes ont sélectionné des caractères d'intérêt pour l'alimentation humaine entraînant une hausse de la productivité mais aussi une baisse de la diversité génétique au sein des espèces cultivées par rapport à leurs ancêtres sauvages. Les programmes d'amélioration ont souvent fait usage de ces ancêtres ou encore d'espèces sauvages proches (Hajjar & Hodgkin, 2007) pour améliorer la résistance des espèces cultivées aux facteurs abiotiques (sécheresse, salinité, pauvreté des sols) et biotiques (insectes ravageurs, maladies).

Les adaptations aux conditions locales des plantes cultivées sont le résultat de pratiques agricoles et de sélection variétale réalisées par les agriculteurs. Ainsi, face aux futures conditions climatiques, les agriculteurs développent des stratégies telles que l'utilisation de variétés plus résistantes à la sécheresse, le développement de systèmes de récupération de l'eau, la pratique des cultures associées, d'agroforesterie et la diversification des pratiques agricoles (Altieri, 2009).

Valorisation de la diversité sauvage : le cas du mil

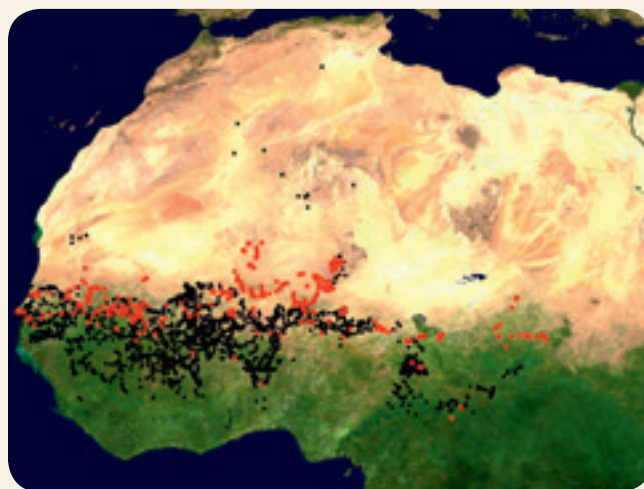
Le mil cultivé (*Pennisetum glaucum* ssp. *glaucum*) a été domestiqué à partir d'une forme sauvage (*P. glaucum* ssp. *monodii*) dans une région située entre le Mali et le Niger il y a environ 4 800 ans (Cloutault *et al.*, 2012). La perte de diversité liée à sa domestication est estimée à environ 30 % (Oumar *et al.*, 2008). Le mil sauvage présente une résistance à l'aridité plus importante. À ce titre, il présente un intérêt considérable pour l'identification de gènes et de polymorphisme impliqués dans l'adaptation à des conditions climatiques extrêmes qui pourront par la suite servir à l'amélioration de la résistance du mil cultivé au climat futur.

En effet, en Afrique, le mil répond en partie aux conditions arides par une réduction du cycle de floraison. Durant les années 1970, l'Afrique de l'Ouest a connu une période de sécheresse importante avec un déplacement d'un isohyète de 100 mm de 150 km vers le sud. Pendant cette période, les agriculteurs ont sélectionné le mil de sorte à réduire son cycle de floraison de 1,44 jour en moyenne sur 27 ans. Cette évolution et adaptation variétale ont été associées particulièrement, à un allèle (du gène PHYC) dont la fréquence dans les variétés a doublé. Pendant cette période de forte sécheresse, les

agriculteurs ont su mobiliser la diversité intraspécifique du mil pour répondre aux nouvelles conditions climatiques (Vigouroux *et al.*, 2011).

Identifier les gènes impliqués dans la résilience et l'adaptation des plantes cultivées au changement climatique

Le projet « Génomique des populations pour l'étude de l'adaptation des populations de mil sauvage » (MILDIV) a pour objectif de mettre en évidence chez le mil sauvage des variations génétiques corrélées au gradient climatique allant du Sénégal jusqu'au Soudan. Les variations génétiques identifiées seront mises en relation à des variations phénotypiques par des méthodes de génétique d'association. Ceci permet à la fois de mettre en évidence l'adaptation génétique et d'y associer le facteur adaptatif ainsi que son expression phénotypique. L'approche choisie pour mener à bien ce projet fait appel au séquençage à l'échelle du génome grâce aux nouvelles générations de séquençage haut-débit. Ces gènes identifiés présenteront un intérêt pour développer des outils permettant de déterminer rapidement les meilleures plantes adaptées aux futures conditions climatiques plus extrêmes. Ceci permettra notamment d'accélérer les programmes de sélection variétale.



▲ Distribution du mil sauvage (rouge) et du mil cultivé (noir) en Afrique de l'Ouest.

Géo-référencement des accessions de graines de mil de la collection maintenue à l'IRD.

Carte réalisée par C. Berthouly-Salazar/IRD.

Agir sur les cycles de la matière organique et des nutriments

L'équilibre et le fonctionnement des écosystèmes sont déterminés par des flux de matières, d'énergie et d'informations qui traversent les différentes parties qui les composent : le sol, les plantes, les animaux, l'atmosphère, etc. (Frontier & Pichod-Viale, 1998).

Dans les écosystèmes, les matières organiques sont les vecteurs de ces flux de matières et d'énergie et elles déterminent les cycles des principaux éléments chimiques tels que le carbone, l'azote et le phosphore (Swift *et al.*, 1994). Toute modification de l'organisation d'un écosystème et de ses flux de matières et d'énergie entraîne alors un impact sur sa productivité et sa durabilité.

Dans un écosystème, les matières organiques constituent une ressource renouvelable qu'il convient de gérer au mieux pour assurer les différents services écosystémiques. En effet, la dynamique de ces matières organiques met en jeu des formes variées de carbone (unité de mesure de la matière organique) manipulées par divers acteurs (hommes, plantes, animaux) qui les produisent, les consomment ou les transforment le long de divers [chemins trophiques](#) (Manlay *et al.*, 2007).

Dans le cas des systèmes agro-sylvo-pastoraux, notamment dans les zones soudaniennes et soudano-sahéliennes, la productivité des agrosystèmes est basée en grande partie sur la gestion de la ressource organique (Manlay *et al.*, 2004 ; Nye & Greenland, 1960 ; Pieri, 1989 ; Tiftonell *et al.*, 2007). Dans un contexte de risques climatiques accrus ou de contraintes socioéconomiques, tout changement d'usage des terres implique une modification des compartiments organiques et des

processus de transfert que les écosystèmes ou les terroirs villageois ont mis en place au cours du temps. Par exemple, la disparition des jachères limite non seulement la biomasse végétale mais aussi les ressources pastorales disponibles pour le bétail alors qu'il assure un transfert de fertilité depuis les zones non cultivées vers celles cultivées. *A contrario*, la bonne gestion de ces ressources organiques, et des flux de nutriments et d'énergie que ces ressources supportent, est un gage de durabilité des pratiques agricoles.

Agir sur les cycles de la matière organique et des nutriments peut s'effectuer en intervenant à plusieurs niveaux :

- sur la qualité de la ressource organique utilisée dans une pratique agricole : on pourra ainsi privilégier certaines origines de litières comme celles des légumineuses généralement plus riches en azote. Les fumiers constituent des matières organiques transformées et les pratiques de compostage permettent de stabiliser la décomposition d'une matière organique tout en s'enrichissant en éléments nutritifs comme l'azote minéral ;
- sur les pratiques qui favorisent les recyclages des matières organiques dans les terroirs comme l'intégration des arbres, des cultures et de l'élevage, qui apparaît alors comme un élément central de la durabilité de certains agrosystèmes.



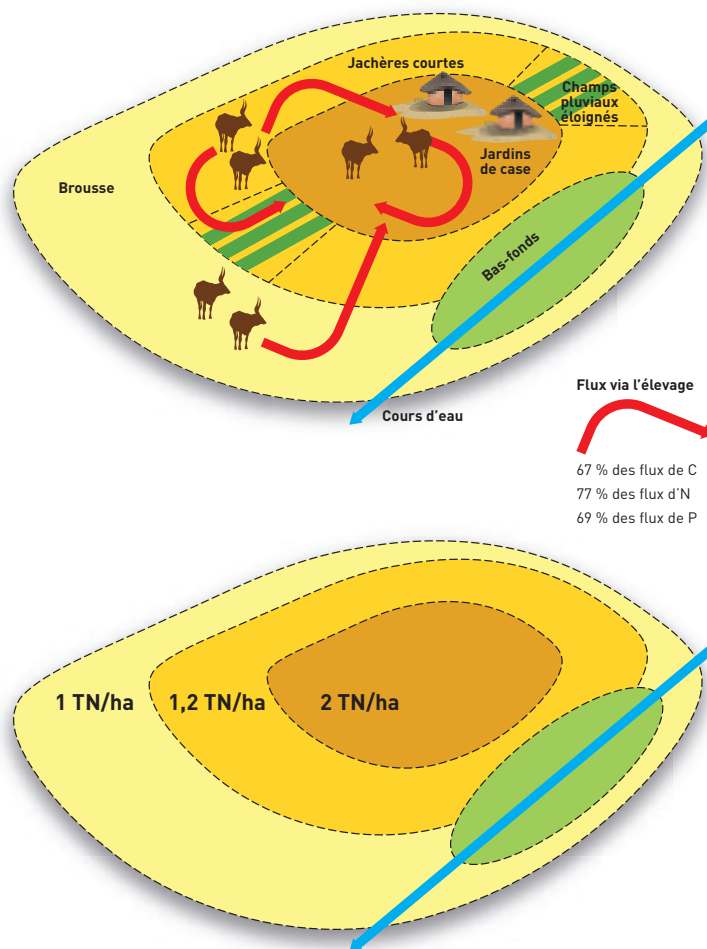
◀ Troupeau mixte ovin, porcin, bovin, en fin de saison sèche, Tsiafajavona, Hautes Terres de Madagascar.
© K. Naudin

RENFORCER L'INTÉGRATION DE L'ÉLEVAGE ET DE L'AGRICULTURE TOUT EN PRÉSERVANT LES RESSOURCES NATURELLES

Le système agro-sylvo-pastoral : un système adapté pour les savanes ?

Les savanes, dominées par une strate herbacée parsemée d'arbres et d'arbustes, sont contraintes par des feux de brousse et la présence d'herbivores (Koppel & Prins, 1998). Les savanes sont riches en multiples mammifères herbivores (gazelles, antilopes, gnous, buffles, etc.) qui occupent des niches trophiques spécifiques. Cet écosystème abrite les plus grands mammifères terrestres et la plus grande biomasse d'herbivores par unité de surface. Ainsi, la savane est reconnue comme étant l'un des écosystèmes les plus productifs en termes de biomasse animale (Mooney *et al.*, 2001 ; Abbadie *et al.*, 2006).

On retrouve cette grande diversité, hétérogénéité et complexité dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux reconstitués et gérés par les populations humaines rurales de façon traditionnelle (van Keulen, 2006). En effet, comme nous l'avons déjà vu, les terroirs villageois s'organisent classiquement en trois grandes zones en dehors de la zone de l'habitat : les champs de case, les champs de brousse et les parcours (savanes arborées ou forêts). Le paysage est ainsi marqué par l'alternance de couverts à dominance ligneuse et de cultures annuelles. Le bétail joue alors un rôle essentiel dans les transferts de fertilité au sein du terroir (*cf. figure ci-contre*).



▲ Stock d'azote par unité paysagère et transferts de fertilité orchestrés par les troupeaux de bovins résultant en auréoles concentriques de fertilité. D'après Mantay *et al.*, 2004.

→ ZOOM | La matière organique du sol est essentielle à la fertilité des sols

La matière organique du sol correspond à l'ensemble des matériaux organiques, vivants et morts, présents dans le sol, ce qui comprend à la fois les racines des plantes, les microorganismes et la microfaune du sol et les résidus de végétaux décomposés ou non. C'est un continuum de matières plus ou moins complexes en perpétuel renouvellement. En effet, la matière organique du sol est alimentée en permanence par les végétaux et animaux morts, ainsi que par des matières organiques issues du métabolisme des êtres vivants comme les exsudats racinaires. Des apports externes de matière organique (compost ou fumier par exemple) l'alimentent également.

La matière organique du sol participe à la fertilité chimique des sols en fournissant des éléments minéraux nutritifs pour les plantes et à la fertilité physique par son effet sur la structure

du sol. Elle constitue un élément important de la qualité des sols pour la production végétale.

Les processus de transformation des composés organiques dans les sols sont des phénomènes complexes dans lesquels interviennent divers facteurs dont les principaux sont : (i) la nature des substrats organiques, (ii) les communautés microbiennes impliquées et (iii) les caractéristiques du milieu dans lequel se déroulent les processus. Ces facteurs interagissent dans l'espace et dans le temps à de multiples échelles, de l'agrégat du sol à l'écosystème ou l'**agro-écosystème**. Manipuler ces différents facteurs peut alors orienter la productivité d'un sol et de l'écosystème ou de l'agrosystème qui l'abrite.

D'après Bernoux & Chevallier, 2013.

On trouve également, dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux, une forte diversité d'espèces végétales cultivées cohabitant avec des plantes non cultivées (légumineuses, céréales, arbres fruitiers, etc.), ainsi que des espèces animales élevées (volaille, porcs, équins, ovins, bovins, caprins, etc.). Ces espèces animales occupent des niches trophiques complémentaires tout comme le font les herbivores sauvages des savanes (*cf. ci-contre*).

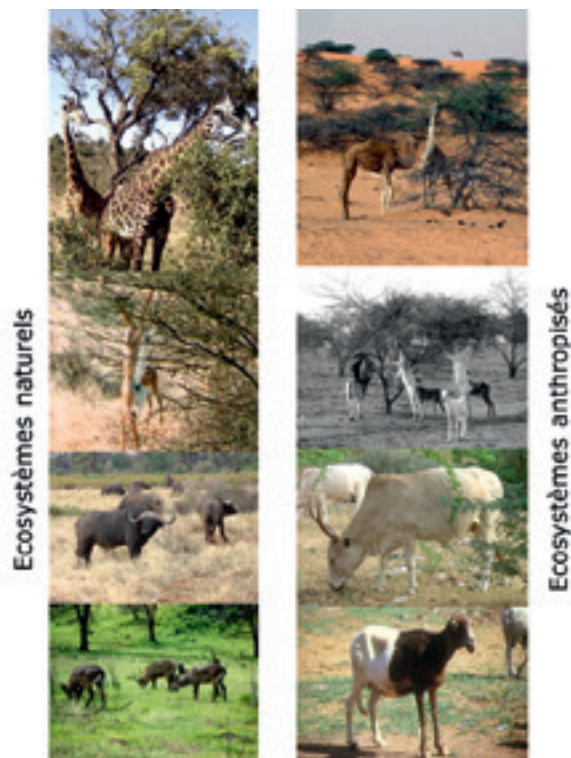
De plus, tout comme dans les savanes naturelles, le feu et les ruminants ont un rôle important dans l'entretien de l'hétérogénéité des systèmes agro-sylvo-pastoraux :

- l'éleveur, ou le chasseur, met le feu volontairement à des rythmes variables (jusqu'à une fois par an dans les champs de case et de brousse et moins fréquemment dans les parcours, savanes et espaces forestiers) ;
- les bergers mènent les troupeaux sur des zones de pâturage et des aires de repos préférentielles conduisant à accentuer l'hétérogénéité spatiale au travers du parcage nocturne qui occasionne piétinement et surpâturage. Cela permet aussi de concentrer la fertilité dans certaines zones (par exemple dans les champs de case) et de créer des zones où les graminées sont exploitées à un rythme plus intense, ce qui améliore la qualité du fourrage lors de la saison des pluies, période de forte croissance fourragère (Augustine, 2003 ; Fynn, 2012). Ces pratiques d'élevage présentent alors des similitudes avec le comportement naturel des buffles de savane (Winnie *et al.*, 2008).

En zones tropicales sèches, l'élevage est fortement présent. C'est une activité particulièrement adaptée aux contraintes climatiques de ces zones surtout si elle mobilise des races rustiques (Nozières *et al.*, 2011). Son haut niveau d'adaptation s'explique par (i) la mobilité des animaux capables de se rendre là où les fourrages et l'eau sont encore disponibles (Leclerc & Sy, 2011) et (ii) la capacité des animaux à stocker et déstocker des réserves corporelles en fonction de la disponibilité saisonnière des ressources fourragères (Mandonnet *et al.*, 2011).

L'élevage, de ruminants tout particulièrement, est présent dans la grande majorité des exploitations et des territoires des zones sèches. En agriculture familiale dans les pays du Sud, l'élevage est souvent associé à l'agriculture (Herrero *et al.*, 2010) et il permet aux systèmes agricoles à bas niveaux d'intrants — qui dominent largement en zones sèches — de produire durablement en fournissant de la fumure animale (Vigne *et al.*, 2013).

La croissance démographique en milieu rural conduit à une saturation progressive de l'espace, à la mise en culture d'une partie des parcours et à une diminution des



▲ Diversité spécifique et niches trophiques similaires occupés par les animaux sauvages dans les écosystèmes naturels et par les animaux d'élevage dans les systèmes anthropisés.

© Google & J. Vayssières, 2014

temps de jachère. Cette dynamique de l'occupation du sol, assez généralisée en zones sèches, conduit à une remise en cause du système traditionnel de transfert de fertilité depuis les parcours vers les zones cultivées et, parfois, à un départ des troupeaux divagants du terroir villageois. Par exemple, dans le bassin arachidier du Sénégal, les troupeaux de bovins partent aujourd'hui en transhumance la quasi-totalité de l'année. On constate donc une baisse significative de la présence des animaux dans la majorité des terroirs villageois de la zone. Le chargement animal est passé de 3 à 1 UBT/ha* environ en moins de 50 ans, ce qui se traduit par une baisse significative de la fumure organique animale disponible.



▲ Élevage de zébus, Sénégal. Jeune berger et son troupeau de zébus.

J.-J. Lemasson © IRD

*UBT : unités de bétail tropical, Unité utilisée pour les charges des pâturages et les consommations. Elle correspond à un animal herbivore de 250 kg vif.

→ ZOOM | Les systèmes « agriculture-élevage » vus comme des réseaux trophiques

Par analogie aux écosystèmes naturels, une ferme — ou un territoire agricole mixte « agriculture-élevage » — peut être représentée et analysée comme un réseau trophique où l'homme serait au sommet de la chaîne, où les cultures et les formations végétales des parcours constitueraient la production primaire et où les ruminants et les autres animaux d'élevage constitueraient les maillons intermédiaires.

Ce mode de représentation est très cohérent avec un des principes forts de l'intégration « agriculture-élevage », à savoir l'utilisation, par une activité, d'une partie de la biomasse produite qui, elle, est produite par une autre activité (et vice versa). Ainsi, comme le montre la figure ci-contre, cette intégration peut être analysée en termes de recyclage de la biomasse. En effet, les parcours — voire les forêts, les cultures et tout autre lieu de production primaire, notamment les arbres hors forêt — génèrent de la biomasse végétale qui est valorisée en partie pour l'alimentation des animaux. Réciproquement, ces animaux produisent de la fumure organique qui permet de restituer des éléments nutritifs aux végétaux.

Cette intégration « agriculture-élevage » a longtemps été décrite d'un point de vue qualitatif uniquement. Ces dernières années, des méthodes quantitatives inspirées de celles permettant l'analyse des réseaux trophiques et s'intéressant aux cycles des nutriments et de l'énergie, sont mises en œuvre pour quantifier le degré d'intégration « agriculture-élevage » dans divers régions du monde : en Éthiopie, Kenya et Zimbabwe (Rufino *et al.*, 2009), à La Réunion (Vayssières *et al.*, 2009), à Madagascar (Alvarez *et al.*, 2013),

dans les Antilles (Stark *et al.*, 2014) et, plus récemment, dans les zones sèches d'Afrique de l'Ouest (Bénégabou *et al.*, 2014). Ces travaux montrent une forte diversité du degré de cette intégration aussi bien d'une région à l'autre que dans une même zone pédoclimatique. Cette forte diversité au sein d'une même zone suppose des marges de manœuvre importantes, l'hypothèse principale étant que plus l'intégration « agriculture-élevage » est poussée et plus l'énergie et les nutriments (dont l'azote) sont conservés au cours de leur cycle et, donc, plus les systèmes agricoles sont efficaces, productifs et respectueux de l'environnement.



▲ Recyclage de la biomasse dans les exploitations mixtes « agriculture-élevage ».

Les matières organiques sont recyclées dans une exploitation familiale où sont associés des cultures et l'élevage. Les flèches indiquent les transferts d'un compartiment à l'autre ainsi que les pertes au cours de ces transferts.

© Reproduction de Rufino *et al.*, 2006

L'élevage et la productivité des systèmes agro-sylvo-pastoraux

En savane, il est aujourd'hui reconnu que la présence des ruminants, à un certain niveau de chargement, favorise la production primaire (de Mazancourt *et al.*, 1999 ; Hayashi *et al.*, 2007). Les animaux, notamment les grands ruminants, accélèrent le recyclage des nutriments par une digestion des biomasses végétales et la production de déjections hautement concentrées en nutriments. Ainsi, dans les systèmes agro-sylvo-pastoraux, les ruminants favorisent la mise à disposition de nutriments nécessaires au développement des cultures, notamment l'azote et le phosphore (de Mazancourt *et al.*, 1999 ; Roux *et al.*, 2006).

La présence de ruminants aboutit en outre à une réorganisation significative des cycles des nutriments (Daufresne & Loreau, 2001) et, au final, permet d'intensifier la productivité des écosystèmes cultivés en zones de savane :

- sur les parcours, le prélèvement de biomasse végétale par les ruminants diminue certes la production de la strate herbacée mais ce broutage peut favoriser également le tallage des graminées, ce qui peut avoir pour effet de stimuler la croissance de la production de biomasse aérienne, si la pression des animaux n'est pas trop forte. Par ailleurs, le prélèvement diminue la biomasse potentiellement soumise au feu, ce qui permet un contrôle indirect du feu et une meilleure conservation de la matière organique (Mbow, 2000). Sur les cultures,



▼ Transhumance peule au Mali.
Transhumance peule et traversée du Niger
par les zébus à Diafarabe au Mali.
G. Fédière © IRD

l'apport de matières organiques par les animaux d'élevage permet de réduire la pression des adventices telles que *Striga hermonthica* sur les céréales sèches (mil, sorgho) et les légumineuses (arachide, niébé) cultivées en zones sèches (Kayeke *et al.*, 2007 ; Dzomeku & Amegbor, 2013) ;

- les ruminants sont capables de digérer la cellulose leur permettant ainsi de valoriser des biomasses non consommables par l'homme et les animaux monogastriques d'élevage (porc, volaille) telles que les fourrages grossiers ou les résidus de culture.

L'élevage peut cependant avoir des effets non bénéfiques notamment pour l'environnement ou la biodiversité. En effet, l'augmentation des effectifs d'animaux domestiques et des élevages, l'amélioration des conditions sanitaires et le développement du transport routier du bétail, exercent une pression négative sur l'environnement dans certaines conditions. Il suffit de voir l'état de la végétation ou la dégradation des sols autour des puits dans le Sahel sur parfois plusieurs dizaines de kilomètres. Dans les parcours surpâturés, la régénération naturelle des ligneux peut être perturbée, provoquant une perte de diversité et de productivité des ligneux. Ces effets sont également accentués par les passages de feux de brousse provoqués par les éleveurs pour régénérer plus rapidement les herbacées. Enfin, la divagation des animaux en saison sèche dans les terroirs empêche bien souvent la mise en œuvre de certaines pratiques culturelles améliorantes comme la plantation de ligneux ou encore d'herbacées (jachères améliorées

par exemple). Les conflits entre éleveurs et agriculteurs demeurent d'actualité notamment là où les ressources naturelles, les sols et jachères, sont partagés. Il est donc parfois nécessaire de retrouver une cohabitation intelligente pour gérer les espaces forestiers, agricoles et pastoraux.

Accroître la résilience des systèmes agro-sylvo-pastoraux en agissant sur l'élevage

Selon l'échelle, il existe trois voies privilégiées d'améliorer la résilience des systèmes agro-sylvo-pastoraux grâce à l'élevage :

- au niveau de la parcelle : accroître les ressources fourragères disponibles ;
- au niveau de l'exploitation agricole : réduire les pertes en nutriments, notamment l'azote, depuis l'affouragement de l'animal jusqu'à l'épandage des fumiers ou de fèces par le parcage des animaux la nuit sur les parcelles cultivées et en passant par les périodes de stabulation de l'animal au niveau de la ferme ;
- au niveau du territoire : aménager l'espace pour faciliter la présence et la mobilité des animaux d'élevage et ainsi permettre les transferts de fertilité tout en limitant l'impact de l'élevage sur les ressources naturelles, notamment des ligneux.

Mis à part les résidus de culture qui sont largement mobilisés pour l'alimentation des animaux, les principales ressources fourragères existent naturellement sur

les parcours (graminées et arbustes essentiellement) et sont fournies par les arbres présents dans les champs (par exemple *Faidherbia albida* dans le bassin arachidier du Sénégal). Accroître le disponible en ressources fourragères permet d'augmenter le disponible en fumure organique et donc d'améliorer le potentiel de fertilisation des cultures.

À l'échelle de la parcelle, la production fourragère peut être accrue par la plantation d'arbres fourragers (Vandenbeldt & Williams, 1992 ; Ibrahim & Tibin, 2003), l'introduction de plantes fourragères légumineuses ou/et la régulation des chargements animaux afin d'optimiser la production primaire des parcours. Accroître les capacités de stockage des fourrages dans des abris, plutôt que dans les arbres ou sur les toitures, permet également de limiter les pertes et de mieux conserver les fourrages jusqu'à la période de soudure. Cette solution technique est d'autant plus bénéfique qu'elle s'applique à des fourrages à haute valeur alimentaire tels que la fane d'arachide ou de niébé.

L'azote est l'élément minéral le plus limitant dans les systèmes agricoles en zones sèches. L'introduction de l'animal dans le cycle de la biomasse conduit à une ouverture du cycle de l'azote, c'est-à-dire à des risques de perte d'azote (Rufino *et al.*, 2006). En effet, la présence de l'animal accroît le nombre d'étapes où la biomasse est transformée, manipulée et où les échanges gazeux sont possibles. Cette présence augmente donc le risque de perte d'azote sous forme gazeuse (ammoniac). En zones sèches, ce risque est accentué par les températures élevées et la faible hygrométrie. En revanche, les pertes sous forme liquide, par érosion ou par lixiviation des nitrates (NO₃⁻), sont probablement limitées étant données les pluviométries plus faibles dans les zones sèches (Vayssières & Rufino, 2012). Ces fuites d'azote sont non seulement des nuisances potentielles pour l'environnement (par exemple, contribution au réchauffement climatique et à l'eutrophisation des milieux aquatiques) mais elles sont aussi à l'origine de pertes de productivité de l'écosystème dans sa globalité.

On peut intervenir à différentes étapes pour limiter les pertes d'azote sous forme gazeuse. Il est en effet recommandé :

- de collecter fréquemment les déjections animales et, si possible, de les rassembler dans une fosse fumière pour limiter les pertes à la production (Blanchard *et al.*, 2013) ;
- de couvrir les fosses fumières avec une bâche pour limiter les pertes au stockage (Tittonell *et al.*, 2010) ;
- d'enfouir la fumure organique à l'épandage pour réduire les pertes au niveau des champs (Murwira, 1995). Il existe une grande diversité de pratiques liées aux déjections animales en Afrique de l'Ouest (*cf. photos ci-dessous*).

Il est plus difficile de limiter ces pertes gazeuses avec la divagation des animaux car une grande partie des déjections est alors directement restituée au champ ou au parcours. L'essentiel des mesures proposées ci-dessus sont applicables quand les animaux passent au moins une partie du temps à l'étable ou dans un parc (cas de l'embouche bovine).

Enfin, à l'échelle du territoire, le maintien de jachères courtes (Odrú, 2013) ou de couloirs au sein du terroir (Brottem, 2014), est une solution pour garder les animaux à l'année. Cependant, ces systèmes doivent être conçus pour relier les différentes zones du terroir, depuis la périphérie du village vers son centre, afin de permettre les transferts de fertilité entre ces zones. Accroître parallèlement la taille des troupeaux de façon raisonnée en lien avec le disponible fourrager du terroir, permet d'augmenter ces transferts de fertilité et donc d'intensifier écologiquement la production agricole à l'échelle des terroirs villageois (Vigan *et al.*, 2014). Cette voie reste plus compliquée à mettre en œuvre car elle suppose une capacité de coordination et d'organisation collective des communautés concernées. Cette capacité peut être renforcée grâce à des travaux de cartographie et de modélisation participative.

▼ Diversité des pratiques de gestion des déjections animales en Afrique de l'Ouest.



Parcage nocturne de bovins sur une parcelle agricole de Sare Yoro Bana.
Casamance, Sénégal.

© J. Vayssières, 2014



Tas de fumier dans une exploitation familiale de Bary-Sine.
Bassin arachidier, Sénégal.

© J. Vayssières, 2014



Fosse fumière dans une exploitation familiale de Koumbia.
Zone cotonnière, Burkina Faso.

© M. Blanchard, 2010

→ EXEMPLE | Un projet pour mieux produire de la fumure organique au Burkina Faso

Dans les systèmes de polyculture-élevage de l'Ouest du Burkina Faso, les agriculteurs pratiquent l'épandage de fumure organique et d'engrais minéraux pour gérer la fertilité de leurs sols. Mais les engrais minéraux restent peu utilisés pour des raisons économiques et seulement 9 % des besoins en fumure organique sont couverts.

En effet, la production de fumure organique s'appuie sur des techniques peu diversifiées, valorisant une faible fraction des biomasses produites sur l'exploitation (ordures ménagères, déjections animales et résidus de culture) : seuls 12 % des résidus de culture produits seraient ainsi utilisés pour la production de fumure organique. Les exploitations sont mal équipées en infrastructures favorisant la valorisation des produits organiques de l'exploitation : seuls 33 % des exploitations possèdent une fosse fumièrre à la concession et 7 % une fosse au champ. De plus, les paysans ont une faible maîtrise des conditions de décomposition de ces biomasses (rapport C/N, aération, humidité) et la matière organique ainsi produite est de faible qualité, 83 % de ces matières organiques présentent des teneurs en carbone et en azote inférieures à, respectivement, 12 g C.100gMS⁻¹ et 0,6 g N.100gMS⁻¹ (Blanchard *et al.*, 2014). L'épandage de fumure organique est souvent limité aux champs proches de la concession et de la fosse fumièrre car seulement 50 % des exploitations possèdent une charrette pour le transport des biomasses (Vall *et al.*, 2006).

Dans ce contexte, l'objectif du projet « Partage d'innovations agro-pastorales et fertilité des sols » (Fertipartenaires, 2008-2014) était d'améliorer la fertilité des sols en augmentant la production des fumures organiques dans les exploitations et en améliorant leur gestion. Le projet s'est appuyé pour cela sur une démarche de conception en partenariat avec les agriculteurs de systèmes agricoles innovants.

Ce projet a permis de renforcer la capacité d'innovation des agriculteurs grâce à l'acquisition et à la construction d'un nouveau référentiel technique sur la production des fumures organiques. Le projet a ainsi contribué à l'élaboration de techniques de fabrication de compost au champ à moindre investissement en temps de travail en s'appuyant sur (i) un remplissage unique de la fosse en fin de saison sèche (année n) et une vidange de la fosse lors de la saison sèche de l'année n+1, (ii) l'utilisation de tiges de coton sans hachage, (iii) l'absence de retournement et (iv) la pluie comme unique apport d'eau. Les évaluations *ex post* du projet ont montré que la production de fumure organique dans les exploitations avait augmenté grâce à la multiplication des lieux de production répartis entre la concession et les champs réduisant les temps de transport. Ainsi, l'utilisation de la fumure a été multipliée par 3,4 entre 2007 et 2011. Ces travaux ont également débouché sur une reformulation des normes d'épandage des fumures organiques selon la qualité des matières organiques disponibles et le type de sol cultivé (*cf. ci-dessous*) par rapport à des standards généralement calés sur une fumure organique de bonne qualité (Berger, 1996).

Recommandations d'application de fumure organique

Type de fumure organique	Application de fumure organique (kg MS ha ⁻¹ an ⁻¹)	
	Sols sableux	Sols argileux
Fumier riche	2 381	2 054
Fumier de qualité moyenne	5 112	4 410
Compost riche	4 047	3 491
Compost de qualité moyenne	5 337	4 604

Tableau d'après Blanchard *et al.*, 2014.
Pour plus d'informations sur le projet Fertipartenaires : <http://food-fertipartenaires.cirad.fr>

→ ZOOM | Un programme de recherche sur les effets du bois raméal sur les sols et les plantes cultivées au Burkina Faso

Les objectifs du programme « *Woody Amendments for Sudano-Sahelian Agriculture* » (WASSA), financé par l'Union européenne et mené conjointement par l'IRD, l'Université de Ouagadougou et l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), sont (i) d'évaluer si les propriétés des sols de savane et les performances des plantes cultivées peuvent être améliorées de façon spécifique en utilisant des amendements raméaux et (ii) de connaître la disponibilité de la ressource en branches dans les territoires villageois.

L'impact de l'amendement du sol avec du bois raméal de *Piliostigma reticulatum*, couplé ou non avec de l'azote minéral, sur le sorgho et sur le sol, a été étudié pendant trois campagnes agricoles sous une pluviosité annuelle moyenne de 700 mm et en comparaison avec des apports traditionnels de résidus de culture. À faible dose (1,5 t MS/ha/an), l'apport de bois raméaux augmente peu les performances du sorgho par rapport à des apports équivalents en paille, mais un peu plus par rapport au témoin sans apport. Cependant, les différences sont rarement significatives, du fait, en partie, des fortes variabilités spatiales et interannuelles des variables suivies. Les propriétés chimiques (carbone, azote, phosphore disponible) sont également peu impactées. En revanche l'apport

de bois raméal stimule fortement l'activité des termites (4 à 18 fois par rapport aux autres traitements). La comparaison des résultats avec d'autres études montre qu'il n'existe pas de tendance généralisable en conditions tropicales sèches. Il existe en effet une diversité des processus d'action des bois raméaux qui dépendrait des conditions écologiques locales.

L'évaluation de la disponibilité de la ressource en bois raméaux pour un usage agroécologique dans deux terroirs villageois (sous climats sec et subhumide) a par ailleurs permis de construire des modèles de prédiction de la biomasse raméale stockée et produite par arbre. La biomasse susceptible d'être la plus disponible, sans compétition avec d'autres usages actuels ou futurs, serait constituée par les branches fines et par les arbrisseaux, soit, respectivement, 1,75 et 8,51 tonnes de matière sèche cultivée en zones sèches et subhumides. Ces estimations sont cependant très incertaines du fait, entre autres, d'une forte hétérogénéité spatiale. Elles suggèrent néanmoins la nécessité de densifier les peuplements ligneux pour satisfaire durablement les besoins en branches même pour des scénarios d'amendements modestes.

D'après Barthès *et al.*, 2010.
Pour plus d'informations : www.wassa-eu.org

RESTAURER LA VIE BIOLOGIQUE DES SOLS DE SAVANES PAR DES INTRANTS ORGANIQUES SPÉCIFIQUES

La fertilisation organique des sols d'Afrique subsaharienne est la principale gestion des matières organiques des sols de ces régions. Les ressources organiques sont souvent limitées dans ces zones et les résidus ligneux (petites branches et feuilles) liés à l'exploitation légale et durable de l'élagage des arbustes ou des recépages (bois raméal) y représentent une ressource organique importante.

En effet, l'application de branches d'arbres sur les sols pour leur conservation ou leur restauration s'inscrit dans une logique d'imitation de l'écosystème arboré naturel. Dans les zones sèches, l'apport de bois raméal imiterait, sur les sols cultivés, des apports organiques existant dans les sols de savanes qui sont considérés comme des modèles de fertilité et de stabilité. L'impact de ces apports de branches d'arbres serait fortement lié à leurs qualités biochimiques (richesse en lignine faiblement polymérisée, teneur minérale équilibrée) qui stimuleraient les champignons plutôt que les bactéries,

ces qualités étant toutefois garanties par l'apport de bois de petit diamètre seulement. La diversification des chemins trophiques entraînerait celle des formes de vie dans le sol, l'amélioration des propriétés du sol, et, finalement, la croissance des plantes. Le carbone apporté aurait autant vocation à être utilisé comme source d'énergie pour maintenir l'organisation de l'écosystème qu'à être stocké de façon durable sous forme stabilisée.

Un état des connaissances scientifiques sur l'impact de l'apport de bois raméal au sol sur l'agro-écosystème suggère un effet généralement positif sur les propriétés du sol et les performances de la plante cultivée (Barthès *et al.*, 2010, *cf. page précédente*). Mais ce document indique également que peu d'études ont été menées en zones arides, et interroge la pertinence du témoin — un traitement sans apport de fertilisant — utilisé pour évaluer l'intérêt du bois raméal par rapport à d'autres pratiques de fertilisation.

▼ Apport de résidus ligneux pour récupérer des sols dégradés. Kindi, Burkina Faso.

© D. Masse





▲ Zai/Tassa sur les plateaux de Badaguichiri, région de Tahoua, Niger.

© B. Bonnet

NOURRIR LOCALEMENT LA PLANTE

De nombreuses observations en milieu naturel montrent que certaines plantes, pour se maintenir en vie, concentrent des éléments nutritifs autour de leur système racinaire. Le *zai*, pratique agricole rencontrée dans les zones sahéliennes du Burkina Faso et du Niger, peut être considéré comme une reproduction de ce principe écologique.

Le *zai* en mooré (langue locale, Burkina Faso) signifie « se lever tôt et se hâter pour préparer sa terre » en émiettant la croûte du sol avant le semis. Il s'agit d'une méthode traditionnelle qui permet de récupérer les terres dégradées (encroûtées), « zipellé », ou très dégradées (« zipédaaga ») dans le Yatenga (région Nord du Burkina Faso). Cette pratique consiste à creuser à la pioche de petites cuvettes de 20-40 cm de diamètre et de 10-15 cm de profondeur en période sèche et à y déposer une ou deux poignées de fumure organique. Elle permet une régénération ponctuelle et localisée de ces sols dégradés qui combine à la fois une ouverture de la croûte de battance, une captation du ruissellement et des éléments organiques, un apport localisé de matière organique et d'éléments minéraux et une réactivation de la vie microbienne. Elle permet d'assurer une production agricole dans des régions particulièrement difficiles.

Au Burkina Faso, les travaux de Roose *et al.* (1999) ont montré que les rendements augmentaient grâce à cette méthode — de 0,2 t.ha⁻¹ de grains de céréales sur la parcelle témoin à 1-1,7 t.ha⁻¹ sur la parcelle aménagée

en *zai*. Zougmoré *et al.* (2005) ont montré également que l'addition dans une cuvette de compost ou de fumier, à la dose de 300g par cuvette, permet d'obtenir un rendement huit fois plus important que sans apport de fumure (800 kg.ha⁻¹ de grains de sorgho). Somé *et al.* (2004), étudiant les effets du *zai* sur la culture du niébé, donnent des résultats semblables : le *zai* permet une production de 200 kg.ha⁻¹ de niébé et de 1 200 kg.ha⁻¹ de fanes, tandis que la production du témoin est nulle. L'apport d'engrais (NPK), dosé à 80 kg.ha⁻¹, ou son association au compost, a permis d'atteindre 900 kg.ha⁻¹ de sorgho sur un zipellé de type gravillonnaire, contre 690 kg.ha⁻¹ avec le compost uniquement.

La mise en jachère des champs soumis à cette gestion de *zai* agricole permet en outre une installation progressive de la végétation (herbes, ligneux) et, par conséquent, aboutit à un autre type de gestion : le « *zai* forestier ». Cette pratique est surtout illustrée par l'expérience d'un agriculteur, M. Yacouba Sawadogo, démarré dans le village de Gourga (région du Yatenga) au début des années 1980. À partir d'une parcelle cultivée en *zai*, il a laissé pousser et a entretenu, au moment du désherbage, les plantules d'arbres plantés dans une cuvette sur trois parmi la culture. À la récolte, les tiges étaient cassées à 1 mètre de hauteur de manière à protéger la jeune plantule de l'érosion éolienne et de la vue du bétail. Au bout de quelques années (5 ans), un couvert forestier a été reconstitué dont les arbustes sont utilisés en taillis ou perches (premières récoltes de bois de feu).

Le *zai* rend ainsi possible la culture sur des terres dégradées en permettant la gestion du ruissellement, la conservation du fumier et des semences, la concentration des éléments fins, des fertilisants et de l'eau dans les cuvettes, à proximité immédiate des plantes, surtout au début et à la fin de la saison des pluies. Par ailleurs le regain des activités biologiques permet d'améliorer les propriétés du sol et de créer un milieu favorable au développement des cultures. À travers cette pratique de réhabilitation, des superficies incultes peuvent être récupérées et l'exploitation rendue possible. Aussi, la pression, sur les terres et sur les ressources naturelles, peut être réduite.

Cependant, le *zai*, malgré ses nombreux avantages, ne peut pas résoudre toutes les contraintes à la production agricole dans le Sahel :

- cette technologie n'est efficace que dans la zone soudano-sahélienne, avec une pluviosité annuelle comprise entre 300 et 800 mm ;
- les poquets de *zai* devant être creusés durant la saison sèche, la pénibilité et la durée du travail restent non négligeables. Selon Roose et *al.* (1995), le *zai* exige 300 heures de travail à la pioche, soit environ 3 mois de travail pour un homme, pour restaurer 1 hectare ;
- les disponibilités en fumier, en eau, en main d'œuvre et en moyens de transport, sont également des facteurs incontournables dans la pratique du *zai* ;
- enfin, le *zai* demande, pour réussir, une gestion de l'eau au-delà de l'échelle de la parcelle, c'est-à-dire à celle du paysage ou du bassin versant notamment par la mise en place dans les champs de cordons pierreux afin de maîtriser le ruissellement et de conserver sur place les matières organiques.



▲ Réparation du sol pour la pratique du *zai* au Burkina Faso (Ziga, Yatenga).

© T. Kaboré



▲ Dépôts des matières organiques dans les mini-cuvettes au Burkina Faso (Ziga, Yatenga).

© T. Kaboré



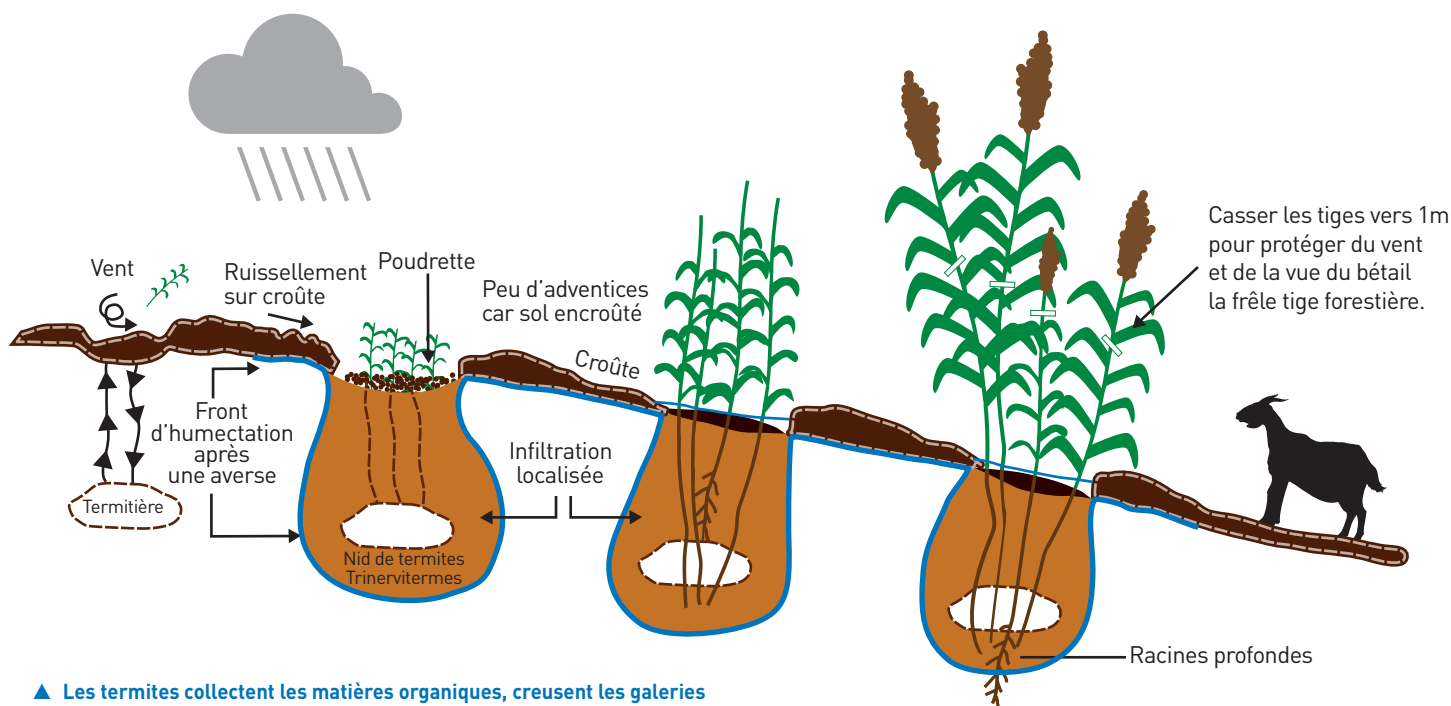
▲ Semis dans une parcelle aménagée en *zai* au Burkina Faso (Ziga, Yatenga).

© T. Kaboré



▲ *Zai* et cordons pierreux sur des parcelles agricoles au Burkina Faso (Ziga, Yatenga).

© D Masse



▲ Les termites collectent les matières organiques, creusent les galeries dans le fond de la cuvette, d'où entonnoir pour le ruissellement.

D'après Roose *et al.*, 1993.

Mieux utiliser l'eau disponible

Dans les zones semi-arides et arides d'Afrique de l'Ouest, l'offre en eau est limitée (300 à 900 mm de précipitation annuelle, saison sèche inférieure à 6 mois) et irrégulière. Cette offre en eau réduite et aléatoire est un facteur limitant les rendements des cultures et sa gestion doit alors être améliorée.

harmoniser l'offre et la demande en eau dans les agro-écosystèmes ont été recensés (*cf. page 40*).

Cette gestion peut être améliorée de différentes façons : (i) adaptation à l'offre aléatoire en eau et aux risques de sécheresse, (ii) conservation de l'eau au niveau de la parcelle en limitant le ruissellement et (iii) prise en compte du rôle essentiel que jouent les arbres sur le sol et l'eau en zones sèches.

Actuellement, la gestion de l'offre en eau consiste en la capture des pluies et des ruissellements de surface. En matière de gestion de la demande, il s'agit de s'adapter à la pénurie chronique ou aux risques de sécheresse en jouant sur de multiples variables. À partir de recherches menées dans les années 1980 au Burkina Faso, les procédés utilisés pour

Enfin, les eaux après leur utilisation par les activités humaines peuvent constituer une ressource non négligeable notamment autour des villes. Le recyclage de ces eaux usées et, notamment, leur utilisation en agriculture participe à une gestion durable de l'eau. Cette gestion durable sera d'autant plus nécessaire si les ressources en eau sont de plus en plus limitées et, plus particulièrement, dans les zones les plus arides. Autour des villes, des projets d'utilisation des eaux usées ont ainsi permis d'intensifier une production ligneuse (*cf. page 40*).

S'ADAPTER À DES PLUIES ERRATIQUES OU AUX RISQUES DE SÉCHERESSE

Une organisation globale de l'exploitation agricole et de la communauté *ad hoc*

Le système de production agricole fondamental de ces zones sèches est une agriculture familiale manuelle, céréalière, pluviale, diversifiée, sous parc arboré, combinée le plus souvent à un élevage. Ce système vise l'autosubsistance avec une commercialisation du surplus. Le stockage des grains permet de réduire la vulnérabilité aux aléas climatiques ou biologiques

▼ Aménagements des parcelles paysannes de la vallée de Badaguichiri, région de Tahoua, Niger.

© B. Bonnet



interannuels. L'eau persistant dans le sous-sol en saison sèche est valorisée par des cultures de décrue (sorgho), les arbres du parc (fruitiers, fourragers) et des productions maraichères arrosées dans les bas-fonds. La réactivité, par exemple lors des semis dès les premières pluies, et une petite mobilité, avec différentes parcelles réparties sur le territoire, permettent de profiter de la distribution aléatoire des pluies et des divers milieux accessibles (pentes, bas-fonds), grâce à un accès souple au système foncier géré au niveau du lignage.

Des techniques culturales qui visent à limiter les besoins en eau des plantes

Des formes de gestion de l'offre en eau à la parcelle existent et sont limitées à des techniques favorisant l'infiltration des pluies (sarclages en saison des pluies, piochages préalables ou *zai* dans les zones à courte

saison et sols compacts ou encroûtés, mulchs localisés) ainsi qu'à des cordons pierreux et des murets antiérosifs sur des sites escarpés et à un petit arrosage manuel des jardins à partir de puisards dans les bas-fonds.

Les techniques culturales appliquées à la parcelle visent aussi à gérer la demande, par une adaptation étroite à une offre réduite en eau par le choix de la plante cultivée : le mil au nord, puis, en allant graduellement vers le sud, le sorgho, le maïs, le riz et les tubercules. Calage du cycle, photopériodisme, résistances, profondeurs de l'enracinement, sont également les principaux caractères adaptatifs des variétés locales. Les techniques culturales extensives (faible densité, faible niveau de fertilisation) et les sarclages constitueraient une autre source de réduction de l'évapotranspiration (Serpantié & Milleville, 1993).

▼ Riz pluvial sur couverture de *Stylosanthes guianensis*.
Lac Alaotra, Madagascar.
© K. Naudin



▼ Procédés d'harmonisation de l'offre et de la demande en eau dans l'agro-écosystème.

Deux critères sont ici croisés : le caractère traditionnel ou introduit récemment et le processus écosystémique qu'implique la pratique considérée de gestion de l'eau.

Fonctions	Processus impliqué dans l'écosystème	Organismes ou constituants dédiés	Ingénierie paysanne ou améliorée à faible impact	Ingénierie à fort impact
Capture de l'eau	Capture de l'eau atmosphérique	Arbres et arbustes spécialisés	Capteurs artificiels	
	Capture de l'eau pluviale et des ruissellements exogènes à l'échelle « station » (fonction d'infiltration)	Débris, litières, organismes maintenant une porosité ouverte, d'organismes assurant une destruction des croûtes superficielles (par exemple termites, fousseurs, piétinement des herbivores)	- Mulchs localisés pour réhabiliter les processus d'infiltration - Sarclages superficiels (iler, daba) - Piochages localisés (zai)	Labour
	Capture de l'eau pluviale et des ruissellements exogènes à l'échelle du paysage	Alternance de bandes de végétation et de bandes sans végétation servant d'impluvium (brousses tigrées)	Micro-barrages, réseaux de diguettes, terrasses, demi-lunes, mosaïques cultures-jachères	- Banquettes en terre - Barrages
Mise en réserve	Réserve utilisable	- Matière organique et argile - Arbres et racines spécialisés (baobabs, latex, ignames, cactus, etc.)	Fumure organique Enrichissements en argile Jachères longues	Amendements hydrophiles
Économie d'usage	Accroître la profondeur d'exploration	- Racines pivot - Plantes spécialisées	Mil, arachide, arbres associés	Grande exhaure et distribution
	Réduire la transpiration et sécuriser les phases critiques	Épines, vernis, herbicides naturels, phénologie adaptée, suppression de la strate herbacée, physiologie économe	Faibles densités, sarclages, calendrier, photopériodisme, amélioration variétale	Herbicides
	Redistribuer l'eau et optimiser l'usage inter-saisonnier	Redistribution hydraulique (arbres), étagement	- Parc arboré - Barrages souterrains - Petite exhaure	Barrages réservoirs
	Accroître la capacité d'absorption des reliquats	Plantes spécialisées dans les sols argileux, acacias	Sorgho de saison sèche (muskuari), cucurbitacées dérobées	

→ ZOOM | Réutilisation des eaux usées à des fins de plantations de ligneux

En zones arides et semi-arides, divers pays (notamment le Koweït, la Tunisie et l'Égypte) ont mené des plantations d'espèces à croissance rapide en utilisant les eaux partiellement traitées des stations d'épuration voisines (Bartolone & Arlosoroff, 1987 ; Braatz & Kandiah, 1996). La ville de Mexico a testé, en 1996, le recyclage des eaux usées sur environ 90 000 ha. Braatz et Kandiah (1996) rapportent que 7 à 8 % du volume total des eaux usées urbaines produites dans l'État de Californie (États-Unis) y sont utilisés pour l'irrigation des espaces verts.

Dans les terres sableuses du Sahara, à proximité de grandes villes touristiques, différents projets pilotes de plantation ont vu le jour en Égypte (Qéna, Luxor, Aswan, Wadi Na Troum, Abu Rawash...). Ils ont pour but la réutilisation des eaux usées (REU) de diverses agglomérations à des fins forestières (Bellefontaine, 1998). Pour des raisons économiques, ces eaux subissent souvent un ou deux cycles (traitements primaire et secondaire) avant d'être utilisées pour l'irrigation de forêts artificielles, implantées sur des sols désertiques, parfois salés. La plupart des parcelles visitées impressionnent le visiteur, car elles sont implantées en milieu complètement désertique, sans aucune couverture herbacée. Celle de Luxor, en particulier, montre qu'en moins de deux ans, on peut créer une certaine ambiance forestière, du fait de l'ombrage qu'apportent les ligneux (*Acacia saligna*, *Morus* spp. et *Eucalyptus camaldulensis*)

et d'un début de décomposition de leurs feuilles. Une couverture herbacée apparaît également, ce qui laisse entrevoir une possibilité de sylvo-pastoralisme, à condition que la capacité de charge du bétail soit respectée, ainsi que diverses règles de mises en défens. Ces plantations avec REU sont encore considérées comme des expériences pilotes pour diverses raisons (choix encore restreint des espèces, sylviculture à préciser, évolution des sols et infiltration du surplus des eaux inutilisées dans la nappe phréatique). Tous les risques d'échec partiel ne sont cependant pas levés. En effet, au-delà des problèmes sylvicoles, les principaux problèmes de la REU à régler sont la dynamique de l'eau et des nutriments dans les sols, les formes d'enracinement des ligneux, les interactions avec les pratiques d'élevage, et, enfin, les droits d'utilisation de cette nouvelle ressource ligneuse.



◀ **Eucalyptus** issus de graines « tout venant » âgés de 3 ans et plantés sur sable du désert de Luxor alimentés par des eaux usées, Égypte.

© R. Bellefontaine

CONSERVER L'EAU AU NIVEAU DE LA PARCELLE EN LIMITANT LE RUISSELLEMENT : L'EXEMPLE DES PAILLIS VÉGÉTAUX

Le paillis assure une protection physique des sols

Dans les zones tropicales, l'agressivité des pluies sur les sols dont la couverture végétale est réduite du fait de la mise en valeur agricole ou de la surexploitation des ressources naturelles, participe aux processus d'érosion des sols et *in fine* à leur dégradation.

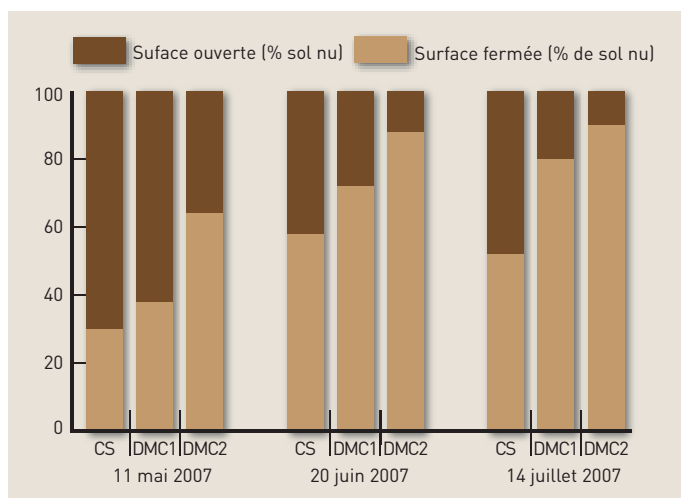
Dans les régions arides et semi-arides soumises à des régimes de pluie irréguliers mais agressifs, les paillis végétaux, constitués des résidus issus des plantes ayant précédé la culture en place, peuvent protéger le sol des impacts directs des gouttes de pluie, réduire les écoulements latéraux responsables des pertes par ruissellement et améliorer la réserve en eau disponible pour les plantes (*cf. figure ci-dessous*). Ces paillis réduisent significativement les pertes directes par évaporation mais ils peuvent aussi intercepter directement l'eau de pluie qui s'évapore alors dans l'atmosphère sans jamais atteindre le sol, ce qui peut limiter en partie leur efficacité si les pluies sont fréquentes et peu importantes.



▲ Effet barrage et effet tortuosité des paillis, même partiels, sur le ruissellement superficiel au Mexique.

© A. Findeling

De telles techniques d'[agriculture de conservation](#) peuvent ainsi réduire les processus d'érosion. Elles sont en effet basées sur les principes de non-travail du sol, de protection de sa surface, de diversification des cultures en rotation et/ou en association avec la culture principale. La présence de résidus végétaux à la surface du sol permet d'améliorer l'état de surface du sol en diminuant la proportion de surface encroutée défavorable à l'infiltration de l'eau comme l'indiquent les résultats d'une étude menée au Mali (*cf. figure ci-dessous*).



▲ États de surface du sol selon le système de culture du coton, 2007, Sud Mali.

Les trois dates se situent au début du cycle de la culture du coton.

Beige. Pourcentage de la surface croutée.

Marron. Pourcentage de la surface poreuse.

CS. Rotation sorgho//coton avec labour conventionnel et sans résidus.

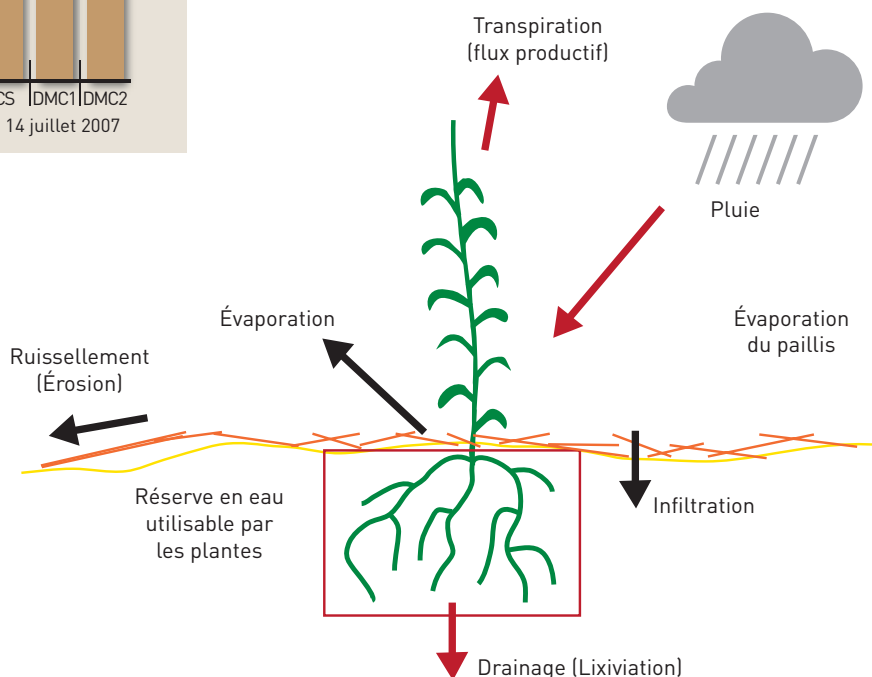
DMC1. Rotation sorgho//coton sans labour et avec résidus.

DMC2. Rotation sorgho+Urochloa ruziziensis//coton sans labour et avec résidus.

D'après Sissoko *et al.*, 2013.

En zones sèches, les biomasses végétales issues des cultures sont exposées à de multiples usages et subissent souvent de fortes pressions de la part des animaux d'élevage qui les consomment (Autfray *et al.*, 2012). Les résidus restants, limités, permettent alors uniquement l'établissement de paillis partiels.

▼ Effets du paillis sur le bilan hydrique par modification du ruissellement, de l'infiltration et de l'évaporation directe du sol.



La présence de paillis, même à des niveaux très faibles, réduit considérablement le ruissellement, lui conférant une capacité à contrôler les processus d'érosion, comme cela a été démontré au Mexique en testant différents niveaux de paillis (de 1,5 à 4,5 tonnes/ha) durant plusieurs années (cf. figure ci-contre). L'augmentation graduelle des quantités appliquées de paille réduit rapidement les pertes par ruissellement par un facteur de 2 à 4. Les pailles forment en effet des barrages naturels à l'écoulement de l'eau, ralentissent son flux et augmentent la sinuosité de son parcours, donnant plus de temps à l'eau pour s'infiltrer. Cette modification du ratio ruissellement/infiltration est généralement l'effet le plus important des paillis et son ampleur améliore considérablement la disponibilité en eau.

Les paillis partiels sont également très efficaces contre l'érosion. En effet, une application de 1,5 t/ha de paillis seulement permet de réduire de 2 à 10 fois les pertes en sol, soit jusqu'à 0,4 t de carbone/ha/an maintenu sur la parcelle en comparaison avec des parcelles non paillées, qu'elles soient labourées ou non. À l'inverse, les préparations mécaniques du sol conduisent à une meilleure captation des eaux de pluies durant les premières précipitations mais elles favorisent ensuite un encroustement rapide des sols. Dès lors, les ruissellements redeviennent très importants et ce, très rapidement si le sol est fragile et le travail du sol trop intense.

L'agriculture de conservation améliore l'activité biologique des sols...

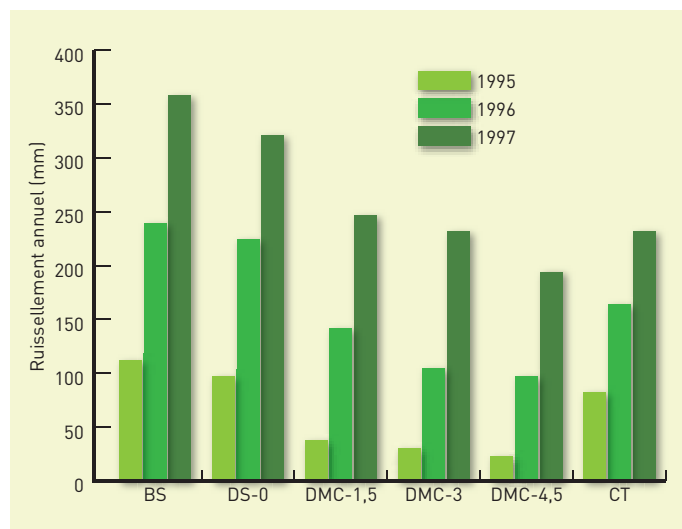
La suppression du travail du sol et la présence d'une couverture végétale favorisent l'activité biologique du sol. Parmi les invertébrés qui sont favorisés par les techniques d'agriculture de conservation, un certain nombre sont considérés comme des « ingénieurs du sol » qui créent, par leur activité, une macroporosité favorable à l'infiltration de l'eau. Ainsi, dans la région de l'Extrême-Nord du Cameroun, les parcelles gérées en agriculture de conservation présentent significativement plus de vers de terre que celles non labourées et sans couverture, ou que celles labourées (cf. figure ci-contre). De tels effets sur la structure du sol et sur la porosité entretiennent des conditions favorables à une bonne dynamique de l'eau.

... et la qualité du bilan hydrique des cultures

Les paillis limitent l'évaporation de l'eau stockée dans les sols. Même si la quantification directe de ce paramètre est difficile, des estimations faites par modélisation au Mexique ont montré que cette évaporation peut être

réduite de 10 à 40 % en fonction des quantités de paillis apportées (Scopel *et al.*, 2004). Les pertes en eau par interception directe du paillis restent limitées avec une capacité d'interception qui reste faible (1 à 3 mm/ha).

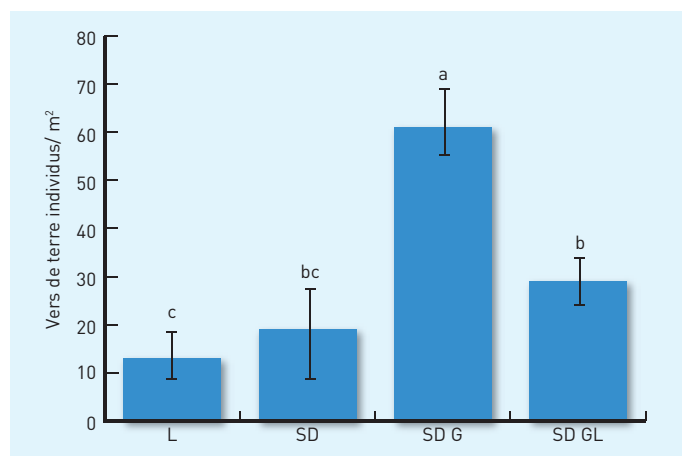
Ces paillis, même très partiels, améliorent donc considérablement la qualité du bilan hydrique des cultures, augmentant systématiquement l'eau disponible en début de période sèche et permettant ainsi aux cultures de fonctionner plus longtemps avant de devoir réduire leur activité photosynthétique et de subir les effets du stress hydrique.



▲ Effet du labour et de la gestion des résidus sur le ruissellement annuel total sur une pente à 7 %, La Tinaja, Mexique, en 1995 (précipitations de 359 mm), 1996 (576 mm) et 1997 (693 mm).

BS. Contrôle, sol nu
 DS-0. Semis direct sans paillis
 DMC-1.5. Semis direct avec paillis (1,5 Mg ha⁻¹)
 DMC-3. Semis direct avec paillis (3 Mg ha⁻¹)
 DMC-4.5. Semis direct avec paillis (4,5 Mg ha⁻¹)
 CT. Labour conventionnel

D'après Scopel *et al.*, 2005.

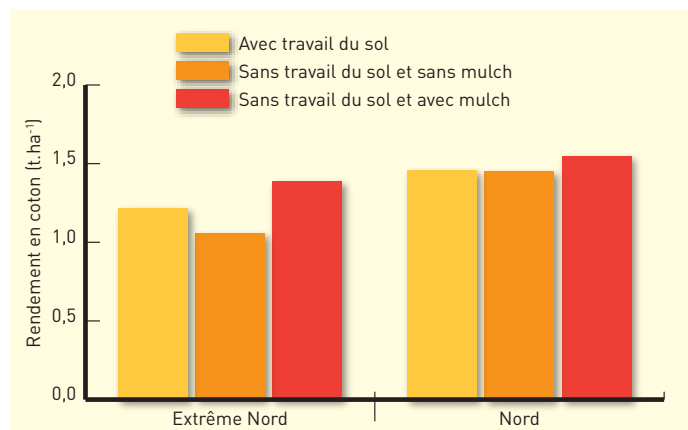


▲ Abondance de vers de terre du sol (classe des *Oligicheta*) selon les techniques culturales, Nord-Cameroun.

L. Labour conventionnel sans couverture végétale.
 SD. Semis direct sans couverture végétale.
 SD G. Semis direct avec couverture végétale et rotation avec des graminées.
 SD GL. Semis direct avec couverture végétale et rotation avec des graminées + légumineuses.

Adapté de Brévault *et al.*, 2007.

Ainsi, dans les contextes de faible pluviométrie, les techniques d'agriculture de conservation améliorent de façon significative, et ce dès la première année, les rendements des cultures pluviales. Au nord-Cameroun, ce constat a été fait uniquement dans les régions les plus arides telles que celle de l'Extrême-Nord (cf. figure ci-dessous).



▲ Rendement de coton graine en parcelles paysannes sous différents modes de gestion du sol. Régions Nord et Extrême-Nord, Cameroun.

D'après Naudin et al., 2010.

Toutefois, les pires situations sont celles qui combinent l'absence de travail du sol et de protection physique. Les techniques de semis direct sans paillis cumulent les effets pervers de la pluie sur les encroutements de surface et la forte érosion des sédiments superficiels, sans bénéficier des effets bénéfiques, même temporaires, du travail du sol. La limite entre un paillis efficace et cette situation pénalisante est donc ténue et il convient de prendre des précautions en fonction des conditions rencontrées (type de sol, pente, pluviométrie) qui joueront sur le seuil de biomasse nécessaire pour modifier de façon significative les termes du bilan hydrique.

Ces impacts sur la productivité primaire de la parcelle dépendent de l'efficacité du paillis à modifier plus ou moins fortement les termes du bilan hydrique (réduction du ruissellement et de l'évaporation directe) et cette efficacité dépendra fortement des conditions locales (sol, pente, intensité des pluies...). Cet effet direct via le bilan hydrique permet non seulement d'augmenter la production dans les zones à pluviométrie structurellement déficitaire, mais également de tamponner les risques dus au caractère aléatoire des pluies dans ces régions. Ces techniques

d'agriculture de conservation basées sur un paillis accompagné d'un semis direct peuvent donc être un facteur non négligeable de sécurisation alimentaire. Enfin, la réduction de l'érosion, la stabilisation d'un stock de carbone dans le sol, l'activation d'une activité biologique stable, sont autant d'effets bénéfiques à plus long terme contribuant à une stabilisation de la production et qui peuvent s'ajouter aux effets à court terme via la modification du bilan hydrique.

Toutefois les biomasses végétales sont soumises dans ces régions à une forte concurrence entre de multiples usages domestiques ou non-domestiques, et, notamment, pour alimenter les animaux durant la saison sèche souvent longue et difficile. Les producteurs sont alors confrontés à des choix difficiles concernant l'utilisation de ces biomasses. Il est donc nécessaire de produire des références sur les conséquences d'une exportation partielle des résidus de récolte (pour l'alimentation du bétail) sur un certain nombre de fonctions de ces biomasses et notamment sur celle de protection des sols. Ainsi, le producteur aura des éléments pour décider des compromis qu'il est prêt à assumer entre la nécessité absolue de nourrir ses animaux et les risques qu'il est prêt à prendre ensuite sur la production de ses cultures pluviales.

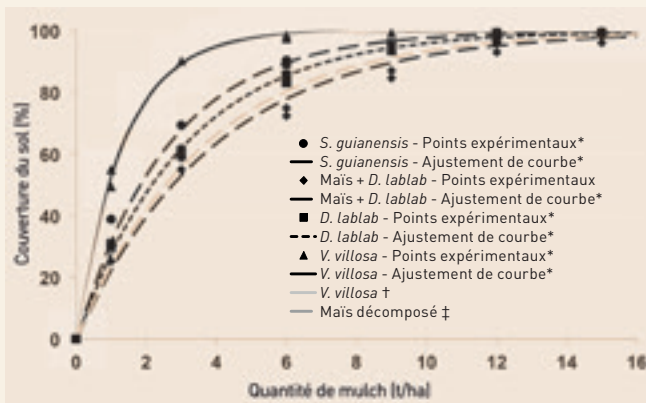
Par ailleurs, la combinaison du non-travail du sol avec des paillages partiels, même si elle s'avère efficace sur la dynamique de l'eau, peut engendrer d'autres problèmes techniques comme une difficulté accrue du contrôle des adventices présents sur le terrain dès les premières pluies. Là aussi, un compromis est à trouver en fonction des capacités des producteurs à contrôler ces adventices par d'autres moyens.

Enfin, même si ces techniques d'agriculture de conservation peuvent s'avérer très efficaces pour améliorer rapidement la production en zones sèches, elles n'en sont pas pour autant des techniques universelles ou efficaces systématiquement. D'autres techniques jouant mécaniquement sur le ruissellement et son contrôle peuvent s'avérer également efficaces dans ces conditions (cordons pierreux, bassins, *zaï*, demi-lunes...). D'ailleurs, la combinaison de ces techniques avec des techniques de paillage peut souvent s'avérer très intéressante.

→ ZOOM | Quelle couverture du sol pour quelle fonction agro-écologique ?

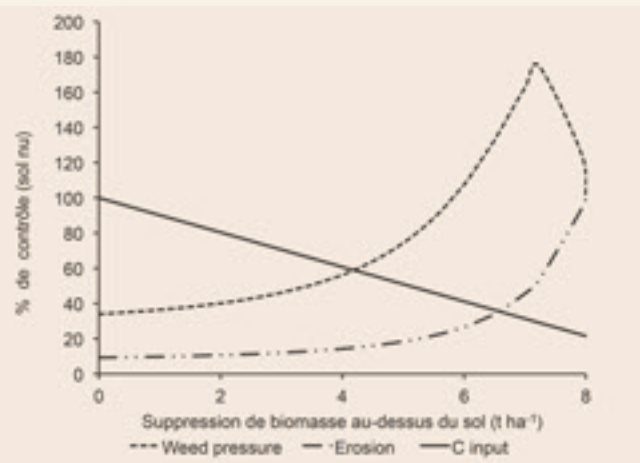
La majorité des effets des paillis dépendent de leur rugosité et de leur capacité à couvrir et à protéger le sol. Ces caractéristiques dépendent de la quantité appliquée sur le sol mais également de la nature et de la forme de ces résidus (cf. figure ci-dessous). Cela signifie que, selon les plantes utilisées, la quantité de paillis à laisser sur la parcelle pour maintenir une certaine couverture sera différente. Avec une plante très couvrante, on aura plus de marge de manœuvre pour exporter une partie de la biomasse et maintenir ce sol protégé. Cette gestion des biomasses dépendra donc des relations entre quantité laissée et fonctions agro-écologiques du paillis — protection contre l'érosion, protection contre la chaleur, bilan hydrique, restitution de carbone, restitutions de nutriments, activation biologique, lutte contre les adventices, etc. — et lesquelles de ces fonctions on voudra privilégier. En effet, les relations entre taux de couverture et efficacité d'une fonction agro-écologique ou d'un service agro-environnemental donné, vont différer entre elles en fonction des espèces et les seuils nécessaires pour assurer une certaine efficacité minimale ne seront pas forcément les mêmes non plus.

Cela signifie également qu'à partir d'une biomasse initialement produite sur la parcelle et en fonction de sa nature, on peut établir des courbes de réponse en termes d'efficacité de telle ou telle fonction agro-écologique selon la quantité exportée. Cette quantité exportée étant celle que le producteur aura à raisonner s'il a plusieurs utilisations potentielles pour cette biomasse. On voit ainsi que les fonctions ne sont pas affectées de la même façon et que certaines se maintiennent plus longtemps, soit qu'elles peuvent être efficaces même avec des quantités faibles de paillis. Le producteur devra donc décider de la quantité de biomasse qu'il exporte en privilégiant la fonction qu'il désire le plus maintenir.



▲ Variation de la couverture du sol en fonction des quantités de paillis apportées et selon différentes combinaisons de plantes cultivées et de types de couverture.

D'après Naudin *et al.*, 2012.



▲ Relation théorique entre exportation de biomasse et différents facteurs de production tels que la pression des adventices de culture, le contrôle de l'érosion et l'apport de matière organique.

Simulation réalisée pour *Stylosanthes guianensis* produisant 8 t ha⁻¹ de biomasse aérienne (données relevées à Madagascar).

D'après Naudin, 2012.

PRENDRE EN COMPTE LE RÔLE ESSENTIEL QUE JOUENT LES ARBRES SUR LE SOL ET L'EAU EN ZONES SÈCHES

Les arbres jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau et le bilan hydrique d'une région. L'interception de la pluie par les houppiers diminue l'énergie dynamique des gouttes d'eau qui s'infiltrent alors mieux dans le sol sur lequel elles tombent. Cette eau interceptée est largement évaporée et s'ajoute à l'évaporation par les feuilles de l'eau absorbée par les racines. Les quantités d'eau relativement grandes stockées dans les racines et le tronc peuvent être remobilisées et évaporées quand les racines ne suffisent plus à assurer la demande en eau de l'atmosphère quand celle-ci devient très sèche. En créant une porosité du sol importante le long des

racines mortes ou vivantes, l'arbre contribue à accroître les réserves hydriques du sol.

Grâce à leurs racines pérennes et profondes, les arbres peuvent aller puiser l'eau dans des horizons de sols qui ne sont pas exploités par la plupart des plantes herbacées, surtout en zones sèches. Seules les racines de certains arbres sont capables de pénétrer dans des horizons cuirassés ou compactés. Les dix racines les plus profondes (entre 15 et 68 mètres) ont été observées chez des espèces de milieux arides ou semi-arides (Canadell *et al.*, 1996). De même, l'expansion spatiale des racines

permettrait d'explorer des zones plus vastes que la surface occupée par l'arbre lui-même. Par exemple, les parcs à essences phréatophytes (espèces capables de puiser l'eau des nappes phréatiques via un profond système racinaire) pompent une eau de nappe infiltrée sur des surfaces de 10 ou 100 fois supérieures à celles des zones qu'ils occupent.

Il existe des interactions importantes entre les sols, les aquifères et la couverture végétale, au travers des racines profondes chez certaines espèces ligneuses ou herbacées. Le système racinaire de ces espèces serait capable, la nuit, en absence de transpiration, de redistribuer l'eau par exsudation, verticalement (du bas vers le haut ou inversement) et horizontalement depuis les parties du sol les plus humides vers celles les plus sèches. C'est le processus de « redistribution hydraulique ». Ce processus profiterait d'abord à la plante elle-même, l'eau stockée étant alors remobilisée par la transpiration diurne, et rarement aux plantes associées, même si des publications scientifiques démontrent que

de l'eau libérée dans le sol en surface peut être transpirée par des plantes voisines. En revanche, à l'échelle locale, cette eau qui est évaporée accroît l'humidité de l'air et abaisse la température impactant ainsi directement l'évapotranspiration localement, voire à des échelles plus importantes (climat régional).

Par ailleurs, la dynamique des racines fines en profondeur pourrait également contribuer de manière significative à la séquestration de carbone dans le sol. L'action physico-chimique des racines sur le temps de résidence et la stabilisation de la matière organique dans le sol pourrait constituer un puits de carbone vis-à-vis de l'atmosphère. Enfin, certains éléments (azote, calcium, potassium, magnésium) peuvent être transportés par les flux hydriques (« pompe à nutriments ») à partir d'endroits où ils sont disponibles avec l'eau, en général en profondeur, vers d'autres endroits où ils manquent, généralement en surface à cause du lessivage et de la lixiviation. Il en est de même pour la remontée des cations issus de l'altération de la roche mère.



▲ Baobab dans la savane arbustive. Région de Tambao, province de l'Oudalan, Burkina Faso.

A. Schwartz © IRD



▲ Arbres du Bénin. Karité (*Vitellaria paradoxa*), région de l'Atacora au nord du Bénin.

C. Lissalde © IRD

Maîtriser les paysages et les processus écologiques propres à cette échelle

Les modifications profondes de l'environnement, dues en particulier au changement climatique et à l'accroissement de la pression anthropique sur les ressources, constituent une menace pour la biodiversité et les services qu'elle fournit aux sociétés humaines, notamment pour la production agricole. La diminution des précipitations et l'intensification de l'usage des terres (disparition des jachères, déboisement, feux de brousse) ont déjà entraîné une forte érosion de la couverture végétale naturelle, qui ne subsiste plus que, parfois, sous la forme d'arbres isolés et de parcours pour l'élevage.

L'ÉCOLOGIE DES PAYSAGES AU SERVICE DES AGROSYSTEMES : EXEMPLE DU CONTRÔLE DES RAVAGEURS DE CULTURE

L'effet de ces perturbations sur les services rendus par les écosystèmes, comme la régulation écologique des bio-agresseurs des cultures par leurs ennemis naturels, est mal connu. Les espaces non cultivés, en effet, constituent souvent des habitats pour une grande diversité d'ennemis naturels des insectes ravageurs des cultures. En Afrique sahélienne, le recours aux pesticides pour protéger les cultures vivrières est peu répandu, ce qui soumet la production agricole à la pression des bio-agresseurs. Dans ce contexte, la simplification des paysages agricoles pourrait favoriser les pullulations d'insectes ravageurs, avec des conséquences dramatiques pour la sécurité alimentaire des populations rurales. Conserver, amplifier ou restaurer la régulation écologique des insectes ravageurs des cultures est un des défis à relever pour adapter les systèmes de production agricole aux changements environnementaux. L'identification et la mobilisation des leviers d'action reposent sur une meilleure connaissance des conditions tant écologiques que sociales du milieu considéré (*cf. ci-contre*).

Le champ cultivé est l'échelle généralement privilégiée pour aborder la protection des cultures contre les bio-agresseurs. Dans un contexte d'ingénierie écologique, il n'est pas pertinent de considérer la régulation biologique à cette seule échelle. Le paysage, en tant que mosaïque d'habitats façonnée par la diversité des champs cultivés et des pratiques culturelles, est l'échelle privilégiée pour observer la dynamique des populations du ravageur ciblé, et pour concevoir et évaluer les stratégies de régulation et de contrôle.

À l'échelle du paysage agro-sylvo-pastoral, la gestion des espaces non cultivés est un levier potentiel pour limiter la colonisation des cultures par les insectes ravageurs et favoriser les services de régulation écologique. À ce titre, les parcs agroforestiers tiennent une place importante.

▼ Mosaïque de parcelles d'arachide et de mil sous un parc à acacias (Bambey, Sénégal).

© T. Brévault



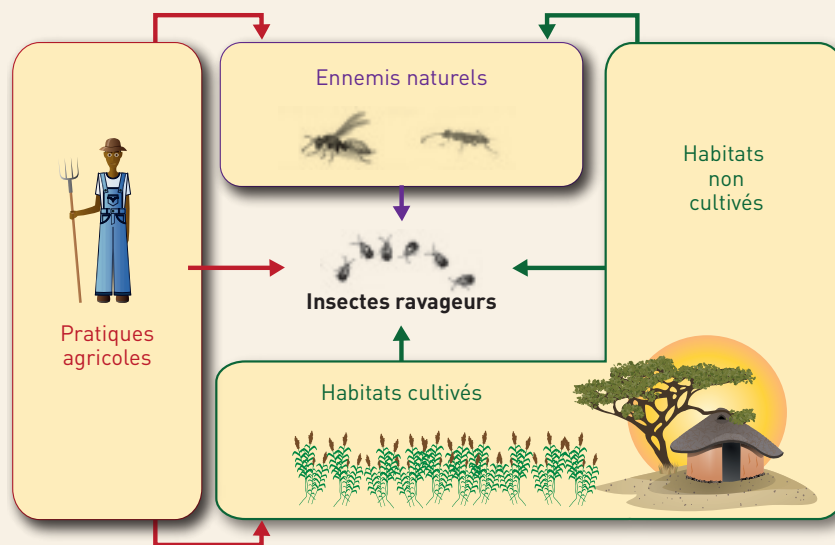
→ ZOOM | Processus et leviers d'action pour lutter contre les ravageurs des cultures

La régulation écologique des bio-agresseurs des cultures est un des services écosystémiques fournis par la biodiversité (Crowder & Jabbour, 2014). Cette régulation s'exerce au travers des ressources utilisées par le bio-agresseur dans son habitat (régulation bottom-up) ainsi qu'au travers de ses ennemis naturels (régulation top-down) tels que les prédateurs et parasitoïdes :

- à l'échelle du champ cultivé, les caractéristiques variétales et les pratiques culturales (par exemple l'association d'espèces cultivées) constituent des leviers d'action mobilisables par l'agriculteur (Ratnadass *et al.*, 2012) ;
- à l'échelle du paysage agro-sylvo-pastoral, les espaces non cultivés peuvent aussi constituer des habitats pour différentes espèces d'ennemis naturels et donc être des supports de régulation écologique des insectes ravageurs des cultures (Rusch *et al.*, 2011). De manière générale, la régulation écologique des bio-agresseurs augmente avec la complexité du paysage (Bianchi *et al.*, 2006 ; Chaplin-Kramer

et al., 2011). En effet, la composition et la configuration des paysages déterminent non seulement la quantité et la qualité des ressources, mais aussi leur accessibilité aux bio-agresseurs en agissant comme des corridors biologiques ou, au contraire, comme des barrières limitant ou retardant la colonisation des cultures par ces bio-agresseurs (Mazzi & Dorn, 2012). La composition et la configuration des paysages jouent également un rôle fondamental sur l'abondance et la diversité des communautés d'ennemis naturels, par la nature des ressources (refuges, sources de nourriture, hôtes alternatifs, etc.) que confèrent les habitats cultivés et non cultivés (Tscharntke *et al.*, 2008 ; Rusch *et al.*, 2012).

L'érosion de la biodiversité et la perte de fonction de régulation écologique qui l'accompagne, qu'elles soient liées à la disparition des habitats naturels ou à l'utilisation incontrôlée de pesticides, accroissent la sensibilité des écosystèmes cultivés aux bio-agresseurs.



◀ Leviers de régulation des populations d'insectes ravageurs des cultures.

D'après Clouvel *et al.*, 2015.

LES PARCS AGROFORESTIERS : QUEL RÔLE DANS LE CONTRÔLE DES RAVAGEURS ?

Il existe un fort regain d'intérêt et un véritable enjeu de développement pour les systèmes agroforestiers dans les zones sèches tropicales de l'Afrique de l'Ouest. Les parcs agroforestiers, tels que, par exemple, les parcs à *Faidherbia albida* associé à des cultures, contribuent aux cycles des nutriments et produisent une biomasse dans les agrosystèmes. Bien que ces impacts soient relativement bien illustrés, certains services de régulation, comme le contrôle des bio-agresseurs, ont été, quant à eux, très peu étudiés.

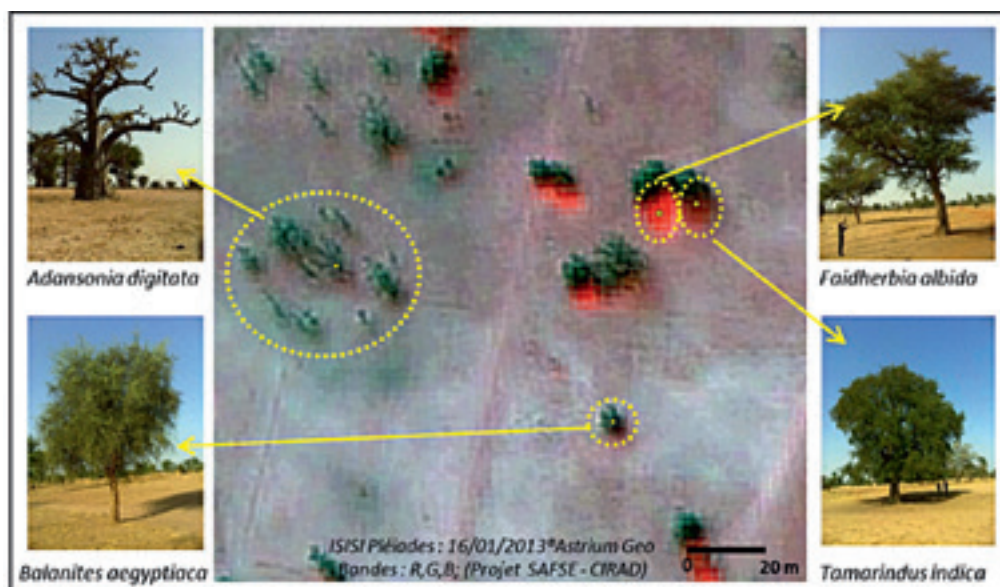
Pourtant, les systèmes agroforestiers — associations de cultures et de ligneux dans un mélange biodiverse — présentent une hétérogénéité de structure — multi-strate et semblable à celle des forêts — offrant ainsi aux insectes ravageurs une plus grande diversité d'habitats qu'une simple mosaïque de cultures annuelles. Ces systèmes agroforestiers jouent alors un rôle de « source » ou de « relais » pour les populations d'insectes ravageurs qui vont coloniser les cultures. En effet, les systèmes agroforestiers peuvent offrir un milieu propice au développement de ces insectes ravageurs qui pourront coloniser les cultures.

Mais les systèmes agroforestiers peuvent également permettre aux ennemis naturels de ces ravageurs de culture de proliférer. Ainsi, ils participent à la régulation écologique des populations de ces bio-agresseurs en offrant à leurs ennemis naturels le « gîte et le couvert » (hôtes ou proies alternatifs, nourriture, refuges), en particulier pendant la saison sèche. Ces systèmes agroforestiers jouent ainsi un rôle de régulation écologique des insectes ravageurs.

À l'échelle du paysage, la densité, la diversité et la distribution des arbres (ou des arbustes) dans l'espace, en constituant des corridors, déterminent le déplacement des populations des arthropodes ravageurs, en permettant la connectivité entre habitats. La gestion de ces habitats est alors un levier potentiel pour limiter la colonisation des cultures par les insectes ravageurs et favoriser les services de régulation écologique.

La densité des arbres et leur répartition spatiale dans un parc agroforestier dépendent des pratiques paysannes. Le développement de certaines pratiques peut agir sur cette densité comme, par exemple, la traction animale qui implique des coupes non contrôlées des jeunes pousses d'arbres. L'histoire du parc et les pratiques qu'il subit, modifient alors les habitats des insectes ravageurs et de leurs ennemis naturels (comme c'est le cas de la mineuse de l'épi de mil, cf. *ci-contre*).

L'augmentation de la [biodiversité fonctionnelle](#) (ici les ennemis naturels) est ainsi vue comme un facteur de résilience de l'écosystème face à des perturbations environnementales (climat, occupation du sol, invasions biologiques, etc.). Il est à noter que la pluralité d'échelles spatiales et temporelles à considérer suppose la mise en œuvre d'outils d'acquisition, de gestion et d'analyse de données spatiales combinant la télédétection, le traitement d'images satellitaires à très haute résolution et les systèmes d'information géographique.



▲ Détermination d'arbres à partir d'images satellitaires à très haute résolution de type Pléiades, Sénégal.

D'après Soti, 2013.

→ EXEMPLE | Cas de la mineuse de l'épi de mil au Sénégal

Au Sénégal, la mineuse de l'épi, *Heliocheilus albipunctella* de Joannis (Lepidoptera, Noctuidae), représente une contrainte majeure à l'intensification de la production de mil (Youm & Owusu, 1998 ; Ba *et al.*, 2013), une des céréales les plus consommées en milieu rural. La mineuse a commencé à causer des dégâts dans les cultures de mil [jusqu'à 85 % de pertes de rendement en grains] suite à une longue période de sécheresse au début des années 1970 (Vercambre, 1978 ; Gahukar, 1990).

Les adultes émergent du sol un à deux mois après le début de la saison des pluies. Après accouplement, les femelles pondent sur les épis au stade de la floraison. Après éclosion, les jeunes larves perforent les glumes et dévorent l'intérieur des fleurs, tandis que celles plus âgées coupent les pédoncules floraux, formant ainsi des galeries sur l'épi selon un tracé en spirale caractéristique. Au terme de leur développement, les larves se nymphosent dans le sol (chrysalides) où elles restent en diapause pendant toute la saison sèche (Bal, 1992). En l'absence de traitements insecticides, l'intervention des

ennemis naturels (comme le parasitoïde *Habrobracon hebetor*) est une composante majeure de la régulation des populations de ce ravageur.

Il existe différents leviers d'action pour mieux gérer, activer et renforcer les processus de régulation de ce ravageur :

- à l'échelle du système de culture : facilitation entre espèces grâce à l'association du mil avec d'autres espèces (endogènes ou introduites) ;
- à l'échelle de l'exploitation agricole : stratégies d'évitement par le jeu des dates de semis et la durée de cycle des variétés cultivées ;
- à l'échelle du territoire : régulation naturelle des populations locales de *H. albipunctella* par leurs ennemis naturels.

À terme, il s'agit de construire avec les acteurs du territoire considéré, des stratégies d'action individuelles et collectives comprenant l'ensemble des leviers socialement mobilisables pour réguler les populations de ravageurs de cette culture.



▲ **En haut** : larves du parasitoïde *Habrobracon hebetor*, en train de dévorer une chenille d'*Heliocheilus albipunctella*.

▲ **En bas** : chenille d'*Heliocheilus albipunctella* sur un épi de mil.



▲ **À droite** : parasitoïde femelle à la recherche d'une jeune chenille pour y déposer ses œufs.

© T. Brevault

Contraintes économiques et sociales au développement d'une ingénierie écologique des systèmes agro-sylvo-pastoraux des zones sèches

La multifonctionnalité de l'agriculture désigne l'ensemble des fonctions qu'elle rend en plus de la production primaire à des fins alimentaires et domestiques (protection des ressources naturelles, des paysages et de la diversité biologique, équilibre des territoires, emploi...).

L'agriculture familiale est, par exemple, considérée comme une référence en matière d'agriculture multifonctionnelle parce qu'elle assure un ensemble de fonctions complémentaires à celle directement alimentaire. Ces fonctions révèlent l'adaptation des sociétés rurales aux contraintes de leur milieu. Elles peuvent se décliner dans le champ de la durabilité : fonctions environnementales mais aussi économiques, sociales ou même patrimoniales.

La diversité de ces fonctions et leur maintien, dans des formes différenciées d'agriculture et d'utilisation de l'espace, passent par l'accès à des savoirs et à des techniques locales ou scientifiques, et par des formes d'organisation collective ou institutionnelle permettant la mise en œuvre concertée de solutions appropriées à l'échelle paysagère. Ce dossier présente un ensemble de propositions techniques et pratiques, qui ne prétend pas être exhaustif, mais qui vise à donner des éclairages stimulants sur le champ des possibles en matière d'ingénierie écologique dans des contextes fortement contraints par la sécheresse et l'aridité.

▼ Travaux champêtres dans la région de Niakhar, Sénégal.

Récolte et stockage des épis de mil.

D'après Soti, 2013.

À l'évidence, la mise en œuvre de telles initiatives doit prendre en compte un certain nombre de facteurs, notamment socio-économiques et sociétaux, qui conditionnent le réalisme des solutions proposées. En effet, l'ensemble des propositions techniques et pratiques décrites dans les chapitres précédents, suppose que, par ailleurs, ces contraintes soient analysées et que des solutions d'un autre ordre soient également proposées.

En effet, comment diffuser de nouvelles pratiques auprès d'agriculteurs et d'éleveurs qui vivent dans un environnement économique dominé par une grande instabilité des prix de vente des produits, dans un contexte social où la permanence des droits d'accès aux paramètres essentiels de la production comme la terre et l'eau n'est pas assurée, dans un contexte social et sociétal qui régit la répartition des productions, l'héritage des biens, le travail familial et le contrôle social. À cela, il convient d'ajouter les questions de paix civile et d'insécurité. Enfin, toutes les propositions techniques et techniques faites dans les chapitres précédents ont un coût, et dans un contexte général de pauvreté des agricultures familiales et donc de capacités limitées à investir, la question de savoir qui va financer quoi doit être impérativement soulevée.



Pour diffuser et faire adopter ces pratiques innovantes, ou traditionnelles (mais améliorées) d'ingénierie écologique par les agriculteurs et les éleveurs des zones sèches, il est indispensable de prendre en compte les contraintes sociales et économiques auxquelles ils sont exposés.

La question foncière est essentielle dans ces régions. En effet, l'amélioration et la restauration des sols sont des investissements durables. Or, agriculteurs et éleveurs des zones sèches sont très souvent dans des situations d'incertitude quant à l'avenir des droits d'accès au sol. Comment alors demander à un agriculteur d'améliorer ses terres, son sol, s'il n'est pas certain de les cultiver quelques années plus tard ? Le droit d'accès à la terre doit être le premier paramètre à prendre en considération. Il ne s'agit pas là de prôner la généralisation de la propriété individuelle avec bornage et inscription, mais de s'assurer que les droits, coutumiers ou régaliens, garantissent un accès à la terre à long terme aux agriculteurs et aux éleveurs.

Les questions économiques doivent également être prises en considération :

- **Les prix.** Si l'on analyse la variation du cours du sac de mil pendant une année, on constate des variations quasi insupportables pour les producteurs, de l'ordre du simple au double. Une telle instabilité nuit à toute augmentation de la production agricole et il conviendrait de poursuivre la réflexion sur la mise en place de mécanismes de stabilisation des prix agricoles, à l'instar de ce que fût la politique agricole commune pendant 40 ans en Europe, alors que paradoxalement l'Union européenne, en conjonction avec l'Organisation mondiale du commerce et les bailleurs multinationaux, refuse d'envisager de telles pratiques. Et c'est l'ensemble des prix agricoles qu'il faudrait prendre en considération, ceux des cultures vivrières comme des cultures commerciales.

- **Les investissements.** Les pratiques innovantes, ou traditionnelles (mais améliorées) nécessitent la mise en place de nouveaux investissements pour améliorer les sols, capter l'eau, assurer la diversité biologique, redresser la fertilité et le fonctionnement des écosystèmes. Ces investissements demandent des fonds et de la main d'œuvre tandis que certains travaux vont immobiliser les terres pendant plusieurs années avant qu'elles ne soient productives. Qui va suppléer aux besoins des agriculteurs pendant ce temps-là ? Comment vont-ils trouver la main d'œuvre nécessaire

pour des travaux qui peuvent parfois être lourds ? Et si ces travaux sont mécanisés, qui va pré-investir pour payer le matériel, son fonctionnement et son entretien ? Rappelons que le contexte est celui d'une agriculture familiale à faible capacité d'investissement, au système bancaire souvent inexistant et, parfois, dans un contexte à faible capacité de mobilisation de la main d'œuvre familiale et villageoise si trop d'adultes ont migré vers des régions plus propices à l'agriculture ou vers les villes.

La mise en œuvre de pratiques d'ingénierie écologique doit prendre en compte également les questions sociales et sociétales. En effet, l'agriculture et l'élevage sont pratiqués dans des contextes sociaux et sociétaux assez anciens qui régissent, en plus de l'accès à la terre, les héritages de biens meubles et immeubles, l'organisation du travail et de la société en général, la répartition des fruits de l'agriculture et de l'élevage. Tout changement des pratiques culturelles et d'élevage va induire des modifications de l'ordre social établi et il convient de bien prendre conscience des oppositions et des transformations qui vont en résulter. Tout ceci doit être envisagé au préalable de toute action en concertation avec les acteurs concernés au risque d'assister à des blocages, considérés comme incompréhensibles par les techniciens.

Par ailleurs, on assiste depuis quelques années à des mouvements importants, que ce soit celui de la déconcentration, où l'État confie à des services locaux des responsabilités importantes, celui de la décentralisation, où l'État confie la gestion des espaces à priori non cultivés aux communautés villageoises, ou celui de la création d'organisations paysannes, prélude à de véritables syndicats d'exploitants agricoles. Ce sont là des acteurs majeurs à prendre en compte, au même titre que les agents de l'État dans ses services déconcentrés (agriculture, élevage, hydraulique, environnement, forêts...) et que les élus des nouvelles communes rurales.

Enfin, les questions de paix civile et de sécurité constituent un domaine qui échappe aux chercheurs, techniciens, économistes et agronomes, mais qui est crucial pour le bon fonctionnement des sociétés. En effet, comment envisager des techniques novatrices dans des contextes d'insécurité qui proviennent de situations sociales explosives (délinquance rurale) ou de conditions exogènes dont les déterminants se trouvent ailleurs (situations géopolitiques ou militaires) ?

L'ingénierie écologique pour des systèmes agro-sylvo-pastoraux durables

Les régions arides et semi-arides en Afrique de l'Ouest sont sous l'emprise d'un climat dont la caractéristique principale est sa forte variabilité inter et intra-annuelle.

depuis plusieurs milliers d'années ont mis en œuvre des agricultures adaptées à ces contraintes.

Dans les agricultures visant avant tout l'autosuffisance alimentaire, les systèmes de production agricole sont basés sur un ensemble de facteurs de production (intrants, plantes cultivées, technicité) qui répondent à un objectif de limitation du risque sans nécessairement chercher une maximisation de la productivité. À l'image des savanes, cette agriculture dite « pluviale », qui s'est accommodée des pluies éparses ou aléatoires, est bâtie sur une intégration « ligneux-agriculture-élevage ». Cette intégration apparaît au sein d'une exploitation, parfois à l'échelle des villages, où des éleveurs et des agriculteurs coexistent, mais également à celle de plus vastes territoires à travers le pastoralisme nomade et les pratiques de transhumance.

De même, les sols, supports de la production primaire, présentent, de par leur pédogénèse, une richesse nutritive souvent limitée. Les sociétés humaines installées dans ces régions

La croissance démographique au cours du siècle dernier — et qui se poursuivra au 21^e siècle —, la mondialisation et le changement climatique, ont imposé et imposeront des transformations majeures des agricultures des zones sèches. Des déséquilibres sont déjà apparus, entraînant des pertes de productivité, parfois la dégradation des ressources naturelles — comme les sols ou les savanes — et de la biodiversité. Simultanément, de nouveaux modèles de société apparaissent tels que l'urbanisation qui s'avère être un processus durable et certainement irréversible.

L'activité agricole n'échappe pas à ces transformations et doit s'adapter. Diminuer l'empreinte écologique agricole et adapter l'agriculture au changement climatique semblent inéluctables. À ce titre, revenir à des circuits courts d'approvisionnement alimentaire, à *minima* sous-régionaux, apparaît nécessaire. Les zones sèches doivent trouver leur place dans l'économie agricole de l'Afrique de l'Ouest.

▼ Jachère en savane sèche du Burkina Faso.

Paysage de jeunes jachères sous parc arboré en saison sèche.

A. Fournier © IRD



Des zones les plus arides, vouées majoritairement au pastoralisme, aux régions plus humides où l'agriculture pluviale est possible, il existe de nombreuses pratiques adaptées aux conditions aléatoires inhérentes aux climats sahéliens ou soudano-sahéliens. Ces pratiques agro-sylvo-pastorales, parfois anciennes, peuvent servir de base de travail pour une intensification agro-écologique de la production et de la productivité des terres, voire du travail. L'étude de ces pratiques ou de ces organisations anciennes doit alors s'accompagner d'une compréhension des processus écologiques qui gouvernent le fonctionnement des écosystèmes naturels, tels que la savane arborée ou les forêts sèches

des régions arides et semi-arides, afin de mieux identifier de nouvelles techniques plus efficaces dans ce nouveau contexte mondial.

Associer ainsi études agronomiques, études écologiques et études des sociétés et de leur organisation gage de résilience, contribuera à délimiter les contours des évolutions futures de l'agriculture des régions sèches. Ces ensembles de « possibles » pour l'agriculture de ces régions devront être soumis aux agriculteurs et éleveurs, ainsi qu'aux décideurs politiques pour imaginer leur avenir dans un contexte de contraintes climatiques et socio-économiques croissantes.

▼ En pays bassari. Sénégal.

O. Barrière © IRD



Pour en savoir plus...

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbadie L., Gignoux J., Le Roux X., Lepage M. (eds), 2006. *Structure, Functioning, and Dynamics of a Savanna Ecosystem*. New York: Springer, 419 p. (Ecological Studies).
- Achour A., Defaa C., Yigouti A., Bouiche L., Hossayni A., Elmousadik A., Msanda F., Bellefontaine R., 2013. Éléments techniques pour réussir une plantation d'arganiers - Cas de Tifaddine. *Revue Forestière Française*. 65(4): 329-340.
- Altieri M.A., 1995. *Agroecology: the science of sustainable agriculture*. Westview press, Boulder, CO.
- Altieri M.A., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 74: 19-31.
- Altieri M.A., 2009. Agroecology, small farms and food sovereignty. *Monthly review*. 61: 102-109.
- Alvarez S., Rufino M.C., Vayssières J., Salgado P., Tittone P., Tillard E., Bocquier F., 2013. Whole-farm nitrogen cycling and intensification of crop-livestock systems in the highlands of Madagascar: an application of network analysis. *Agricultural Systems*. 126: 25-37.
- Asse R., Lassoie J.P., 2011. Household decision-making in agroforestry parklands of Sudano-Sahelian Mali. *Agroforestry Systems*. 82: 247-261.
- Augustine D.J., 2003. Long-term, livestock-mediated redistribution of nitrogen and phosphorus in an East African savanna. *Journal of Applied Ecology*. 40: 137-149.
- Autfray P., Sissoko F., Falconnier G., Ba A., 2012. Usages des résidus de récolte et gestion intégrée de la fertilité des sols dans les systèmes de polyculture élevage : étude de cas au Mali-Sud. *Cahiers Agricultures*. 21(4): 225-234.
- Ba N.M., Baoua I.B., N'Diaye M., Dabire-Binso C., Sanon A., Tamo M., 2013. Biological control of the millet head miner *Heliocheilus albipunctella* in the Sahelian region by augmentative releases of the parasitoid wasp *Habrobracon hebetor*: effectiveness and farmers' perceptions. *Phytoparasitica*. 41(5): 569-576.
- Bal A.B., 1992. *Les principaux insectes du niébé dans le Sahel et leur contrôle*. Deuxième séminaire sur la lutte intégrée contre les ennemis des cultures vivrières dans le Sahel. Bamako, Mali, 4-9 janvier 1990, INSAH.
- Barthès B.G., Manlay R.J., Porte O., 2010. Effets de l'apport de bois raméal sur la plante et le sol : une synthèse des résultats expérimentaux. *Cahiers Agricultures*. 19: 280-287.
- Bartolone C.R., Arlosoroff S., 1987. Reuse of pond effluent in developing countries. *Water Sciences and Technology*. 19(12): 289-297.
- Bationo B.A., Karim S., Bellefontaine R., Saadou M., Guinko S., Ichaou A., Bouhari A., 2005. Le marcottage terrestre : une technique économique de régénération de certains ligneux tropicaux. *Sécheresse-Science et Changements planétaires*. 16(4): 309-311.
- Belem B., Boussim J.I., Bellefontaine R., Guinko S., 2008. Stimulation du drageonnage de *Bombax costatum* Pelegr. et Vuillet par blessures de racines au Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*. 295(1): 71-79.
- Bellefontaine R., 1998. *Support for the French Egyptian project designed to create artificial forests in desert zones near Edfu, Qena and Luxor irrigated by waste water from these cities*. Mission to Egypt, April 22-30, 1998. Cirad-Forêt, Montpellier, France.
- Bellefontaine R., 1999. Aménagement forestier et conservation de la diversité génétique : exemple basé sur la régénération des brousses tigrées. In: Ouedraogo A.S. et Boffa J.M., éd. *Actes du premier atelier régional de formation sur la conservation et l'utilisation durable des ressources génétiques en Afrique de l'Ouest, Afrique Centrale et Madagascar*, 16-27 mars 1998, Vers une approche régionale des ressources génétiques forestières en Afrique subsaharienne, IPGRI, Rome: 107-113.
- Bellefontaine R., 2005. Pour de nombreux ligneux, la reproduction sexuée n'est pas la seule voie : analyse de 875 cas – Texte introductif, tableau et bibliographie. *Sécheresse-Science et Changements planétaires*. 16(4): 315-317.
- Bellefontaine R., Gaston A., Petrucci Y., 2000. Management of natural forests of dry tropical zones. *FAO Conservation Guide*. 32.
- Bellefontaine R., Et-Tobi M., Mhirit O., 2005. Les ligneux urbains et agro-sylvo-pastoraux des zones sèches et arides à faible couvert ligneux. *Revue Sécheresse-Science et Changements planétaires*. 16(4): 306-308.
- Bellefontaine R., Sabir M., Kokou K., Guniko S., Saadou M., Ichaou A., Hatem C., Bationo B.-A., Karim S., Dourma M., 2005. Argumentaire pour l'étude et l'utilisation des marcottes et drageons dans les pays à faible couvert ligneux. *Sécheresse*. 1.
- Bellefontaine R., Malagnoux M., 2008. Vegetative Propagation at low cost: a method to restore degraded lands. In: C. Lee & T. Schaaf (Ed.). *The Future of Drylands. International Scientific Conference on Desertification and Drylands Research. Tunis, Tunisia, 19-21 June 2006*. UNESCO Publishing, Man and the Biosphere series (Paris) and Springer SBM (Dordrecht): 417-433.
- Bellefontaine R., Malagnoux M., Ichaou A., 2012. Techniques forestières et innovations dans les opérations de reboisement. In: A. Dia & R. Duponnois (Ed.) *La Grande Muraillle Verte. Capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. IRD Éditions: 433-469.
- Bénagabou O.I., Vayssières J., Vigne M., Vall E., Lecomte P., Bougouma V., Nacro, H.B., Blanchard M., 2014. *Recyclage des biomasses au sein d'exploitations de polyculture-élevage et efficacité d'utilisation de l'énergie brute*. Actes de la 4^e semaine scientifique CORAF, Niamey, Niger, juin 2014.
- Berger M., 2006. L'amélioration de la fumure organique en Afrique soudano-sahélienne. *Agriculture et Développement*.
- Bernoux M., Chevallier T., 2013. Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables. *Les dossiers thématiques du CSFD*. N°10. décembre 2013. CSFD/Agropolis International, Montpellier, France.
- Bertness M.D., Callaway R., 1994. Positive interactions in communities. *Trends in Ecology & Evolution*. 9: 191-193.
- Bianchi F., Booiij C.J.H., Tschardtke T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings Royal Society B*. 213: 1715-1727.
- Blanchard M., Vayssières J., Dugué P., Vall E., 2013. Local technique knowledge and efficiency of organic fertilizer production

- in South Mali: diversity of practices. *Agroecology and Sustainable Food Systems*. 37: 672-699.
- Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P., Vall E., 2014. Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les recommandations de fumure ? *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*. 18(4): 512-523.
- Braatz S., Kandiah A., 1996. Recyclage des eaux usées urbaines pour l'irrigation des forêts et des arbres. *Unasylva*. 185: 22-31.
- Brottem L., 2014. Hosts, strangers and the tenure politics of livestock corridors in Mali. *Africa*. 84(4): 638-657.
- Brevault T., Bikay S., Maldès J.M., Naudin K., 2007. Impact of a no-till with mulch soil management strategy on soil macrofauna communities in a cotton cropping system. *Soil and Tillage Research*. 97(2): 140-149.
- Boudsocq S., Lata J.C., Mathieu J., Abbadie L., Barot S., 2009. Modelling approach to analyse the effects of nitrification inhibition on primary production. *Functional Ecology*. 23: 220-230.
- Callaway R.M., 2007. *Positive interactions and interdependence in plant communities*. Springer, Dordrecht.
- Canadell J., Jackson R.B., Ehleringer J.R., Mooney H.A., Sala O.E., Schulze E.-D., 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*. 108: 583-595.
- Catinot R., 1994. Aménager les savanes boisées africaines. Un tel objectif semble désormais à notre portée. *Bois et forêts des tropiques*. 241: 53-70.
- Chaplin-Kramer R., O'Rourke M.E., Blitzer E.J., 2011. A meta-analysis of crop pest and natural enemy response to landscape complexity. *Ecology Letters*. 14: 922-932.
- Chirat G., 2010. *Description et modélisation du comportement spatial et alimentaire de troupeaux bovins en libre pâture sur parcours, en zone tropicale sèche*. PhD Thesis, Montpellier SupAgro, Montpellier, France.
- Clotault J., Thuillet A., Buiron M., De Mita S., Couderc M., Haussmann B., Mariac C., Vigouroux Y., 2012. Evolutionary history of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br.) and selection on flowering genes since its domestication. *Molecular biology and evolution*. 29: 1199-1212.
- Clouvel P., Martin P., Brévault, T. 2015. *Stratégies de protection des cultures : du modèle biologique au territoire. Introduction*. Séminaire du Dispositif de recherche et d'enseignement en partenariat DIVECOSYS, 2-4 juin 2015, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal.
- Corbin J.D., Holl K.D., 2012. Applied nucleation as a forest restoration strategy. *Forest Ecology and Management*. 265: 37-46.
- Crowder D.W., Jabbour R., 2014. Relationships between biodiversity and biological control in agroecosystems: current status and future challenges. *Biological Control*. 75: 8-17.
- Daufresne T., Loreau M., 2001. Plant-herbivore interactions and ecological stoichiometry: when do herbivores determine plant nutrient limitation? *Ecology Letters*. 4: 196-206.
- Do Rego F.A., Diop I., Sadio O., Da Sylva M.C., Agbangba C.O., Touré O., Kana K., Neyra M., Ndoye I., Wade T.K., 2015. Response of cowpea to symbiotic microorganisms inoculation (arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium) in cultivated soils in Senegal. *Universal Journal of Plant Science*. 3(2): 32-42.
- Dutoit T., 2013. *L'ingénierie écologique, nouvel oxymore ou nouveau paradigme écologique. Regards et débats sur la biodiversité*. Société Française d'Écologie.
- Dzomeku I.K., Amegbor I.K., 2013. Effect of organic manure and neem seed powder on *Striga hermonthica* control in maize in the Guinea savannah zones of Ghana. *International Journal of Science & Nature*. 4: 673-682.
- Floret C., Pontanier R. (Ed.), 2000. *La jachère en Afrique tropicale : rôles, aménagement, alternatives*. Actes du séminaire international, Dakar, 13-16 avril 1999. IRD/J. Libbey, Paris; Montrouge.
- Frontier S., Pichod-Viale D., 1998. *Ecosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution*. Dunod, Paris.
- Fynn R.W.S., 2012. Functional resource heterogeneity increases livestock and rangeland productivity. *Rangeland Ecology & Management*. 65: 319-329.
- Gahukar R.T., 1990. Sampling techniques, spatial distribution and cultural control of millet spike worm, *Rhaghuva albipunctella* (Noctuidae:Lebidoptera). *Annals of Applied Biology*. 117: 45-50.
- Garine E.D., 1995. *Le mil et la bière. le système agraire des Duupa du massif de Poli (nord-Cameroun)*. Université Paris 10.
- Garrity D.P., Akinnifesi F.K., Ajayi O.C., Weldesemayat S.G., Mowo J.G., Kalinganire A., Larwanou M., Bayala J., 2010. Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa. *Food Security*. 2: 197-214.
- Griffon M., 2006. *Nourrir la planète*. Editions Odile Jacob - Sciences, Paris.
- Griscom H.P., Ashton M.S., 2011. Restoration of dry tropical forests in Central America: a review of pattern and process. *Forest Ecology and Management*. 261: 1564-1579.
- Hajjar R., Hodgkin T., 2007. The use of wild relatives in crop improvement: A survey of developments over the last 20 years. *Euphytica*. 156: 1-13.
- Harfouche A., Meilan R., Kirst M., Morgante M., Boerjan W., Sabatti M., Scarascia Mugnozza G., 2012. Accelerating the domestication of forest trees in a changing world. *Trends in Plant Sciences*. 17: 64-72.
- Harivel A., Bellefontaine R., Boly O., 2006. Aptitude à la multiplication végétative de huit espèces forestières d'intérêt au Burkina Faso. *Bois et Forêts des Tropiques*. 288(2): 39-50.
- Hayashi M., Fujita N., Yamauchi A., 2007. Theory of grazing optimization in which herbivory improves photosynthetic ability. *Journal of Theoretical Biology*. 248: 367-376.
- Herrero M., Thornton P.K., Notenbaert A.M., Wood S., Msangi S., Freeman H.A., Bossio D., Dixon J., Peters M., van de Steeg J., Lynam J., Rao P.P., Macmillan S., Gerard B., McDermott J., Sere C., Rosegrant M., 2010. Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*. 327: 822-825.
- Ibrahim A., Tibin I.M., 2003. Feeding potential of *Faidherbia albida* ripe pods for Sudan desert goats. *Journal of King Saud University - Science*. 4(1): 137-144.
- Janzen D.H., 1988. Tropical dry forests. The most endangered major tropical ecosystem. In: Wilson E.O. (Ed.), *Biodiversity*. National Academy of Sciences/Smithsonian Institute, Washington DC: 130-137.
- Jideani I., 1990. Acha — *Digitaria exilis*— the neglected cereal. *Agriculture International*. 42(5): 132-134.
- Kayeke J., Sibuga P.K., Msaky J.J., Mbwaga A., 2007. Green manure and inorganic fertiliser as management strategies for witchweed and upland rice. *African Crop Science Journal*. 15(4): 161-171.
- Kizito F., Sène M., Dragila M.I., Lufafa A., Diedhiou I., Dossa E., Cuenca R., Selker J., Dick R.P., 2007. Soil water balance of annual crop-native shrub systems in Senegal's

- Peanut Basin: the missing link. *Agricultural Water Management*. 90: 137-148.
- Koppel J.V.D., Prins H.H.T., 1998. The importance of herbivore interactions for the dynamics of African savanna woodlands: an hypothesis. *Journal of Tropical Ecology*. 14: 565-576.
- Lahmar R., Bationo B.A., Dan Lamso N., Guéro Y., Tittone P., 2012. Tailoring conservation agriculture technologies to West Africa semi-arid zones: Building on traditional local practices for soil restoration. *Field Crops Research*. 132: 158-167.
- Larwanou M., Abdoulaye M., Reij C., 2006. *Étude de la régénération naturelle assistée dans la région de Zinder (Niger) : une première exploration d'un phénomène spectaculaire*. International Resources Group, USAID.
- Le Boulter H., Brahic P., Bouzoubâa Z., Achour A., Defaa A., Bellefontaine R., 2012. L'amélioration des itinéraires techniques en pépinière de production d'arganiers en mottes-conteneurs hors sol. In: Inra-Maroc (éd.), *Actes du 1^{er} Congrès International sur l'arganier, 15-17 décembre 2011*. Rabat, ANDZOA.
- Leclerc G., Sy O., 2011. Des indicateurs spatialisés des transhumances pastorales au Ferlo. *Cybergeo: European Journal of Geography*. 532: 22.
- Mandonnet M., Tillard E., Faye B., Collin A., Gourdine J.L., Naves M., Bastianelli D., Tixier-Boichard M., Reneaudeau D., 2011. Adaptation des animaux d'élevage aux multiples contraintes des régions chaudes. *Inra Productions Animales*. 24: 41-64.
- Manlay R., Masse D., Chotte J.L., Feller C., Kaire M., Fardoux J., Pontanier R., 2002. Carbon, nitrogen and phosphorus allocation in agro-ecosystems of a West African savanna II. The soil component under semi-permanent cultivation. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 88: 233-248.
- Manlay R., Ickowicz A., Masse D., Feller C., Richard D., 2004. Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna - II. Element flows and functioning of a mixed-farming system. *Agricultural Systems*. 79: 83-107.
- Manlay R.J., Feller C., Swift M.J., 2007. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 119: 217-233.
- de Mazancourt C., Loreau M., Abbadie L., 1999. Grazing optimization and nutrient cycling: potential impact of large herbivores in a savanna system. *Ecological Applications*. 9: 784-797.
- Mazzi D., Dorn S., 2012. Movement of insect pests in agricultural landscapes. *Annals of Applied Biology*. 160: 97-113.
- Mbow C., 2000. *Étude des caractéristiques spatio-temporelles des feux de brousse et de leur relation avec la végétation dans le Parc National du Niokolo-Koba (sud-est du Sénégal)*. PhD Thesis, UCAD, Dakar.
- Mercer K.L.P., Wainwright J.D., 2012. Climate change and the transgenic adaptation strategy: Smallholder livelihoods, climate justice, and maize landraces in Mexico. *Global Environmental Change*. 22: 495-484.
- Meunier Q., Bellefontaine R., Monteuis O., 2008. La multiplication végétative d'arbres et arbustes médicinaux au bénéfice des communautés rurales d'Ouganda. *Bois et Forêts des Tropiques*. 295(2): 71-82.
- Miles L., Newton A.C., Defries R.S., Ravillous C., May I., Blyth S., Kapos V., Gordon J.E., 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*. 33: 491-505.
- Mitsch W.J., 2012. What is ecological engineering? *Ecological Engineering*. 45: 5-12.
- Mitsch W.J., Jørgensen S.E., 2003. Ecological engineering: a field whose time has come. *Ecological Engineering*. 20: 363-377.
- Mooney H.A., Roy J., Saugier B. (Ed.), 2001. *Terrestrial global productivity*. Academic Press.
- Morin A., Bellefontaine R., Meunier Q., Boffa J.M., 2010. Harnessing natural or induced vegetative propagation for tree regeneration in agroecosystem. *Acta Botanica Gallica*. 157(3): 483-492.
- Murwira H.K., 1995. Ammonia losses from Zimbabwean cattle manure before and after incorporation into soil. *Tropical agriculture*. 72(4): 269-273.
- Naudin K., Gozé E., Balarabe O., Giller K.E., Scopel E., 2010. Impact of no tillage and mulching practices on cotton production in North Cameroon: A multi-locational on-farm assessment. *Soil and tillage research*. 108: 68-76.
- Naudin K., Scopel E., Andriamandroso A.L.H., Rakotosolofo M., Andriamaroso Ratsimbazafy N.R.S., Rakotozandriny J.N., Salgado P., Giller K.E., 2012. Trade-offs between biomass use and soil cover. The case of rice-based cropping systems in the Lake Alaotra region of Madagascar. *Experimental Agriculture*. 48: 194-209.
- Naudin K., 2012. *You can't eat your mulch and have it too - Cropping system design and trade-offs around biomass use for Conservation Agriculture in Cameroon and Madagascar*. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, NL.
- Neyra M., Sow H.A., Dia M., Ndoye I., Kane A., Diouf D., Yattara I., Jankowski F., Le Marec J., Le Quere A., Wade T., 2012. Inoculation des plantes cultivées avec des micro-organismes symbiotiques : du transfert de technologie à la construction d'un partenariat multi-acteurs. In: Dia A., Duponnois R. (Ed.). *La Grande Muraille Verte : capitalisation des recherches et valorisation des savoirs locaux*. Marseille. IRD, France: 379-392.
- Noubissié-Tchiagam J.B., Ndzié J.P., Bellefontaine R., Mapongmetsem P.M., 2011. Multiplication végétative de *Balanites aegyptiaca* (L.) Del., *Diospyros mespiliformis* Hochst. ex. A. Rich. et *Sclerocarya birrea* (A. Rich.) Hochst. au nord du Cameroun. *Fruits*. 66(5): 327-341.
- Nozières M.O., Moulin C.H., Dedieu B., 2011. The herd, a source of flexibility for livestock farming systems faced with uncertainties? *Animal*. 5: 1442-1457.
- Nye P.H., Greenland D.J., 1960. *The soil under shifting cultivation*. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal.
- Odru M., 2013. *Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir. Étude de cas d'un terroir villageois Sereer au Sénégal*. Mémoire de Master II ISTOM, Cergy-Pontoise, France.
- Odum H.T., Odum B., 2003. Concepts and methods of ecological engineering. *Ecological Engineering*. 20: 339-361.
- Ong K., Leakey R.R.B., 1999. Why tree-crop interactions in agroforestry appear at odds with tree-grass interactions in tropical savannahs. *Agroforestry Systems*. 45: 109-129.
- Ortiz R., 2011. Agrobiodiversity for climate change. In: Lenné J.M., Wood D. (Ed.), *Agrobiodiversity management for food security: a critical review*. CABI, United Kingdom: 189-211.
- Oumar I., Mariac C., Pham J.-L., Vigouroux Y., 2008. Phylogeny and origin of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br) as revealed by microsatellite loci. *TAG. Theoretical and applied genetics*. 117(4): 489-497.
- Padilla F.M., Pugnaire F.I., 2006. The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 4: 196-202.

- Parrotta J.A., Turnbull J.W., Jones N., 1997. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*. 99: 1-7.
- Pélissier P., 1966. *Les paysans du Sénégal. Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance*. Ministère de l'Éducation nationale - CNRS Éditions, Saint Yriex, France.
- Pélissier P., 1980. L'arbre dans les paysages agraires de l'Afrique noire. In. Pélissier P., L'arbre en Afrique tropicale : la fonction et le signe. *Cahiers ORSTOM, série Sciences Humaines*. XVII: 131-136.
- Peltier R., 1996. *Les parcs à Faidherbia*. Cirad-Forêt, Montpellier, France.
- Pieri C., 1989. *Fertilité des terres de savanes*. Ministère de la Coopération - Cirad, Paris.
- Prudencio C.Y., 1993. Ring management of soils and crops in the West African semi-arid tropics: the case of the mossi farming system in Burkina Faso. *Agriculture, Ecosystems and environment*. 47: 237-264.
- Ratnadass A., Fernandes P., Avelino J., Habib R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 32: 273-303.
- Reij C.P., 2009. Reverdir le Sahel : le succès de la régénération naturelle des arbres. *Agridape*: 6-8.
- Reij C.P., Botoni E., 2009. *La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel: impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles*. Univ. Libre, Amsterdam.
- Rey Banayas J.M., Bullock J.M., Newton A.C., 2008. Creating woodland islets to reconcile ecological restoration, conservation, and agricultural land use. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 6: 329-336.
- Roose E., Kaboré V., Guenat C., 1993. Fonctionnement, limite et améliorations d'une pratique culturale africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cahiers Orstom. Série Pédologie*. 28: 15 9-73.
- Roose E., Kaboré V., Guenat C., 1999. Zaï practice: a West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*. 13: 343-355.
- Roux X., Abbadie L., Fritz H., Leriche H., 2006. Modification of the savanna functioning by herbivores. In. Abbadie L., Gignoux J., Roux X., Lepage M. (Ed.), *Lamto*. Springer New York: 185-198.
- Rufino M.C., Rowe E.C., Delve R.J., Giller K.E., 2006. Nitrogen cycling efficiencies through resource-poor African crop-livestock systems. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 112: 261-282.
- Rufino M.C., Tittonell P., Reidsma P., Lopez-Ridaura S., Hengsdijk H., Giller K.E., Verhagen A., 2009. Network analysis of N flows and food self-sufficiency-a comparative study of crop-livestock systems of the highlands of East and Southern Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 85: 169-186.
- Rusch A., Valatin-Morison M., Sarthou J.P., Roger-Estrade J., 2011 Effects of crop management and landscape context on insect pest populations and crop damage. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 166: 118-125.
- Rusch A., Valatin-Morison M., Roger-Estrade J., Sarthou J.-P., 2012. Local and landscape determinants of pollen beetle abundance in overwintering habitats. *Agricultural and Forest Entomology*. 14(1): 37-47.
- Ruthenberg H., 1980. *Farming system in the tropics*. Clarendon Press, Oxford.
- Samaké O., Dakouo J.M., Kalinganire A., Bayala J., Koné B., 2011. Régénération naturelle assistée – Gestion des arbres champêtres au Sahel. *ICRAF Technical Manual*. 16. Nairobi: World Agroforestry Centre.
- Scopel E., Findeling A., Chavez Guerra E., Corbeels M., 2005. The impact of direct sowing mulch-based cropping systems on soil erosion and C stocks in semi-arid zones of western Mexico. *Agronomy for Sustainable Development*. 25(4): 425-432.
- Scopel E., Macena da Silva F.A., Corbeels M., Affholder F., Maraux F., 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie*. 24: 1-13.
- Scopel E., Triomphe B., Affholder F., Da Silva F.A.M., Corbeels M., Valadares Xavier J.H., Lhamar R., Recous S., Bernoux M., Blanchart E., Mendes I. De C., De Tourdonnet S., 2013. Conservation Agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. 33: 110-130.
- Serpantié G., Milleville M., 1993. Les systèmes de culture paysans à base de mil (*Pennisetum glaucum*) et leur adaptation aux conditions sahéliennes. In. Hamon S. (Ed.), *Le mil en Afrique*. Éditions ORSTOM, Paris: 255-266.
- Serpantié G., Ouattara B., 2001. Fertilité et jachères en Afrique de l'Ouest. In. Floret C., Pontanier R. (Ed.) *La jachère en Afrique tropicale. Rôles, aménagement, alternatives*. Vol. 2. John Libbey Eurotext. Paris: 21-84.
- Sissoko F., Affholder F., Autfray P., Wery J., Rapidel B., 2013. Wet years and farmers' practices may offset the benefits of residue retention on runoff and yield in cotton fields in the Sudan-Sahelian zone. *Agricultural Water Management*. 119: 89-99.
- Somé D., Zombré N.P., Zombré G., Macauley H.R., 2004. Impact de la technique du zaï sur la production du niébé et sur l'évolution des caractéristiques chimiques des sols très dégradés (zipellés) du Burkina Faso. *Science et changements planétaires/Sécheresse*. 15(3): 263-269.
- Soti V., 2013. Outils et méthodes au service de l'écologie du paysage dans le contexte tropical africain. In. Cirad, *Atelier du DP Divecosys sur l'écologie du paysage au service de la gestion des bio-agresseurs des cultures en Afrique de l'Ouest, 2013-12-03/2013-12-06, Cotonou, Bénin*.
- Stark F., Archimède H., Gonzalez-Garcia E., Navegantes-Alves L., Fanckone A., Moulin C.H., 2014. *Crop-livestock integration and agroecological performances of mixed farming systems, III Convención Internacional Agrodesarrollo, Octubre, Varadero, Cuba*.
- Swift M.J., Bohren L., Carter S.E., Izac A.M., Woomer P.L., 1994. Biological management of tropical soils: integrating process research and farm practice. In. Woomer L., Swift M. J. (Ed.), *The Biological Management of Tropical Soil Fertility*. John Wiley & Sons, Chichester: 209-227.
- Teklehaimanot Z., 2004. Exploiting the potential of indigenous agroforestry trees: *Parkia biglobosa* and *Vitellaria paradoxa* in sub-Saharan Africa. *Agroforestry Systems*. 61: 207-220.
- Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 418: 671-677.
- Tittonell P., Vanlauwe B., de Ridder N., Giller K.E., 2007. Heterogeneity of crop productivity and resource use efficiency within smallholder Kenyan farms: soil fertility gradients or management intensity gradients? *Agricultural Systems*. 94: 376-390.

Tittonell P., Rufino M.C., Janssen B.H., Giller K.E., 2010. Carbon and nutrient losses during manure storage under traditional and improved practices in smallholder crop-livestock systems-evidence from Kenya. *Plant and Soil*. 328: 253-269.

Tscharntke T., Bommarco R., Clough Y., Crist T.O., Kleijn D., Rand T.A., Tylianakis J.M., van Nouhuys S., Vidal S., 2008. Conservation biological control and enemy diversity on a landscape scale (Reprinted from *Biol. Control*. 43: 294-309, 2007). *Biological Control*. 45(2): 238-253.

Valentin C., d'Herbés J.-M., 1999. Niger tiger bush as a natural water harvesting system. *CATENA*. 37: 231-256.

Vall E., Dugué P., Blanchard M., 2006. Interweaving of the crop-livestock system and cotton agricultural production. *Cahiers Agricultures*. 15: 72-79.

Vandenbeldt R.J., Williams J.H., 1992. The effect of soil surface temperature on the growth of millet in relation to the effect of *Faidherbia albida* trees. *Agricultural and Forest Meteorology*. 60: 93-100.

Vayssières J., Vigne M., Alary V., Lecomte P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems*. 104: 146-161.

Vayssières J., Rufino M.C., 2012. Managing nutrients cycles in crop and livestock systems with green technologies. In: Arcand Y., Boye J.I. (Ed.), *Green Technologies in Food Production and Processing*. Springer, New York, USA: 151-182.

Vercambre B., 1978. *Raghuwa* spp. et *Massalia* sp., chenilles des chandelles du mil en zone sahélienne. *Agronomie tropicale*. 33(1): 62-79.

Vieira D.L.M., Scariot A., 2006. Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration. *Restoration Ecology*. 14: 11-20.

Vigan A., Vayssières J., Masse D., Manlay R., Sissokho M., Lecomte P., 2014. *Sustainable intensification of crop production in agro-sylvo-pastoral territories through the expansion of cattle herds in Western Africa. Proceedings of the international conference "Livestock, Climate Change and Food Security", Madrid, Spain, 19-20 May.*

Vigne M., Vayssières J., Lecomte P., Peyraud J.-L., 2013. Pluri-energy analysis of livestock systems - A comparison of dairy systems in different territories. *Journal of Environmental Management*. 126: 44-54.

Vigouroux Y., Mariac C., Pham J., Gérard B., Kapran I., Sagnard F., Deu M., Chantereau J., Ali A., Ndjeunga J., Luong V., Thuillet A., Saïdou A., Bezançon G., 2011. Selection for earlier flowering crop associated to climatic variations in the Sahel. *Plos One*. 6(5): e19563.

Vodouhe R., Dako G., Dansi A., Adoukonou-Sagbadja H., 2007. *Fonio: a treasure for West Africa. Regional conference: plant genetic resources and food security in West and Central Africa. 26-30 april 2007, Ibadan, Nigeria: 219-222.*

Wezel A., Rajot J.-L., Herbrig C., 2000. Influence of shrubs on soil characteristics and their function in Sahelian agro-ecosystems in semi-arid Niger. *Journal of Arid Environments*. 44: 383-398.

Winnie J.A., Cross P., Getz W., 2008. Habitat quality and heterogeneity influence distribution and behavior in African buffalo (*Syncerus caffer*). *Ecology*. 89: 1457-1468.

Youm O., Owusu E.O., 1998. Assessment of yield loss due to the millet head miner, *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) using a damage rating scale and regression analysis in Niger. *International Journal of Pest Management*. 44(2): 119-121.

Zida A.W., Bationo B.A., Somé A.N., Bellefontaine R., 2014. Architecture racinaire et aptitude au drageonnage de *Balanites aegyptiaca*, *Sclerocarya birrea* et *Diospyros mespiliformis*. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 8(3): 903-915.

Zongo F., 2013. *Associations légumineuses-céréales dans les agrosystèmes soudano-sahéliens du Burkina Faso. Perceptions et pratiques paysannes, effets du zaï et des amendements organiques et organo-minéraux sur les rendements des cultures associées niébé-sorgho.* Mémoire d'ingénieur. Université polytechnique de Bobo Dioulasso, Burkina Faso.

Zongo K.F., Hien E., Blavet D., Masse D., Drevon J.-J., Clermont-Dauphin C., à paraître. Diversité et logique socio-économique des systèmes de culture associant céréales et légumineuses dans les agro-écosystèmes soudano-sahéliens du Burkina Faso. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*.

Zougmore R., Ouattara K., Mando A., Ouattara B., 2004. Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi-lunes) au Burkina Faso. *Sécheresse*. 15(1): 41-48.

SITES INTERNET

Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) - Agriculture de conservation
www.fao.org/ag/ca/fr

Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique (Gaié)
www.ingenierie-ecologique.org

Laboratoire mixte international «Intensification écologique des sols cultivés en Afrique de l'Ouest» (IESOL)
<https://sites.google.com/site/iesolafrica>

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) – Agroécologie
<http://agroecologie.cirad.fr>



▲ Agriculteur bassari. Sénégal.
O. Barrière © IRD

Lexique

Agriculture de conservation. Agriculture reposant sur une forte réduction, voire une suppression du travail du sol, une couverture permanente des sols et des successions culturales diversifiées (FAO).

Agrosystème. Système dominé par l'action permanente de l'homme en tant qu'agriculteur (Agence de coopération culturelle et technique, 1977).

Agro-écosystème. Écosystème dans lequel prennent place des activités de production agricole (Office québécois de la langue française, 2005).

Agro-socio-écosystème. Écosystème dans lequel prennent place des activités de production agricole et l'ensemble du système social.

Arbre hors forêt. Arbres qui se trouvent sur des terres n'appartenant pas à la catégorie des terres forestières (ou forêts) et autres terres boisées. Ils peuvent donc se retrouver sur les « autres terres », à savoir sur les terres agricoles (incluant prairies et pâturages), sur les terres bâties et sur les terres nues (FAO, 2001).

Biodiversité fonctionnelle. Biodiversité ayant un impact positif sur le développement durable sur les plans écologique, économique et social des exploitations, des filières et des territoires (Minagri, 2014).

Mutualisme. Association bénéfique entre deux organismes vivants sans qu'elle soit vitale ou obligatoire (Bastien et Gauberville coordinateurs. Vocabulaire forestier : écologie, gestion et conservation des espaces boisés. AgroParisTech, CNPIDE, ONF).

Restauration d'un écosystème (ou restauration écologique). Procédé d'assister le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé, ou détruit souvent à la suite d'activités humaines (Société Internationale pour la Restauration Écologique, 2002)

Réhabilitation d'un écosystème. « Elle vise à réparer, aussi rapidement que possible, les fonctions (résilience et productivité), endommagées ou tout simplement bloquées, d'un écosystème en le repositionnant sur une trajectoire favorable (la trajectoire naturelle

ou une autre trajectoire à définir). [...] La restauration *sensu stricto* conduit invariablement à un retour direct et total à l'écosystème préexistant, la restauration *sensu lato* et plus particulièrement encore la réhabilitation, permettent le retour à l'un des stades alternatifs stables possibles ou encore à un écosystème simplifié « synthétique » en tant qu'étape intermédiaire. Les stades alternatifs stables évoqués ici peuvent avoir, ou non, été des étapes dans les processus de la dégradation de l'écosystème original. La différence entre restauration *sensu lato* et réhabilitation réside dans le fait que cette dernière nécessite fréquemment que soit imposé un « démarrage forcé » d'une nouvelle trajectoire de l'écosystème et que soient combattues les conditions d'établissement des seuils d'irréversibilité alors que, par opposition, les projets de restauration s'appliquent à des écosystèmes présentant encore la capacité de réparer eux-mêmes les effets négatifs de perturbations légères » (Aronson *et al.*, 1995).

Réseau/Chemin trophique. Ensemble des relations alimentaires entre espèces au sein d'une communauté et par lesquelles l'énergie et la matière circulent (dictionnaire de l'environnement).

Service écosystémique. Avantage matériel ou immatériel que l'homme retire des écosystèmes (Commission générale de terminologie et de néologie, France, 2013). Citons par exemple les services d'approvisionnement (aliments, eau, ressources génétiques...), les services de régulation des processus naturels (régulation du climat, régulation de l'érosion...), etc.

Service agro-environnemental. Concerne tous les services proposés par des individus ou des groupes sociaux qui concourent à la préservation de l'environnement. On peut citer les services qui concourent à l'assainissement (recyclage de l'eau et des déchets), à la lutte contre la pollution de l'air ou de l'environnement sonore, les services de protection de préservation de la biodiversité et des paysages, etc.

Symbiose. Association entre deux organismes d'espèces différentes, qui est profitable pour chacun d'eux (Office québécois de la langue française, 1999).

ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS

ZiE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso
AgroParis-Tech	Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, France
Cirad	Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement, France
CSFD	Comité Scientifique Français de la Désertification
Embrapa	<i>Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária</i> , Brésil
GMV	Grande Muraille Verte
IAMM	Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier, France
IER	Institut d'Économie Rurale, Mali
Inra	Institut national de la recherche agronomique, France
IRD	Institut de recherche pour le développement, France
ISRA	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
MS	Matière sèche

MVfc	Multiplication végétative à faible coût
ONG	Organisation non gouvernementale
REU	Réutilisation des eaux usées
RNA	Régénération naturelle assistée
UBT	Unité de bétail tropical
UCAD	Université Cheikh Anta Diop, Sénégal
UVSQ	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, France
ETP	Évapotranspiration potentielle
EX-ACT	<i>Ex-Ante Carbon-balance Tool</i>
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GBEP	<i>Global Bioenergy Partnership</i>

Résumé

Dans le contexte actuel de contraintes climatiques et socioéconomiques, les agricultures des zones sèches doivent évoluer afin de s'adapter et de répondre à un double défi : produire plus pour satisfaire les besoins alimentaires importants de populations en croissance, mais aussi produire mieux de façon viable et durable. Pour cela, les agricultures de ces zones doivent évoluer vers des modes de production à la fois plus productifs, économes en ressources naturelles et résistants aux aléas climatiques.

Dans ce cadre, l'ingénierie écologique propose de nouvelles alternatives de gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux caractéristiques des régions arides et semi-arides d'Afrique subsaharienne. Ceci implique de maîtriser la complexité des systèmes étudiés et de s'inspirer à la fois du fonctionnement des écosystèmes naturels de référence à la région agroécologique concernée — les savanes pour les zones sèches ouest-africaines — et des pratiques traditionnelles et savoir-faire locaux issus d'une longue adaptation face aux contraintes environnementales.

À partir des expériences ouest-africaines notamment, différentes options pratiques sont exposées dans ce dossier. On pourra ainsi agir sur la biodiversité des organismes, que ce soit les plantes ou les microorganismes du sol par exemple, favoriser le recyclage des matières organiques et des éléments nutritifs pour les plantes qui sont associées, maîtriser les cycles de l'eau et, enfin, agir sur l'organisation des paysages pour favoriser un meilleur contrôle des ravageurs de culture.

Cependant, développer une telle approche demande une vision intégrée du fonctionnement et de l'évolution des systèmes agro-sylvo-pastoraux. Les questions sociales — le foncier, l'urbanisation et les migrations — et économiques — les marchés des denrées de première nécessité, la pauvreté, etc. — sont des déterminants essentiels qu'il convient de prendre en compte pour le développement durable des populations dans les zones sèches en Afrique subsaharienne.

Mots clés

Ingénierie écologique, systèmes agro-sylvo-pastoraux, biodiversité, recyclage, matière organique, agroforesterie

Abstract

Against the current backdrop of climatic and socioeconomic constraints, dryland farming systems must evolve in order to adapt and respond to a dual challenge—produce more to meet the substantial food needs of growing populations, while also producing better in viable and sustainable ways. Farming systems in these areas have to progress towards production methods that are more productive, natural resource-efficient and climate-proof.

In this setting, ecological engineering offers new alternatives for the typical agrosilvopastoral systems that prevail in arid and semiarid regions of sub-Saharan Africa. This requires managing the complexity of the studied systems and replicating the functioning of reference natural ecosystems of the concerned agroecological region—e.g. savannas for West African drylands—and traditional practices, local know-how based on a long history of adaptation to environmental constraints.

Different practical options are outlined in this Dossier based especially on West African experience. It is possible to focus on making effective use of the biodiversity of organisms, e.g. plants or soil microorganisms, promoting organic matter and nutrient recycling for associated plants, controlling water cycles, and finally adjusting the landscape organization to foster better crop pest control.

However, an integrated vision of the functioning and evolution of agrosilvopastoral systems is required for developing such an approach. Social issues—land, urbanization and migration—and economic issues—basic commodity markets, poverty, etc. — are key factors to be taken into account for the sustainable development of populations in dryland regions of sub-Saharan Africa.

Keywords:

Ecological engineering, agrosilvopastoral systems, biodiversity, recycling, organic matter, agroforestry

Dans la même collection

Numéros déjà parus

La lutte contre la désertification : un bien public mondial environnemental ? Des éléments de réponse...

(M. Requier-Desjardins et P. Caron, janv. 2005)
Disponible aussi en anglais

La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification

(G. Begni, R. Escadafal, D. Fontannaz et A.-T. Nguyen, mai 2005)
Disponible aussi en anglais

Combattre l'érosion éolienne : un volet de la lutte contre la désertification

(M. Mainguet et F. Dumay, avril 2006)
Disponible aussi en anglais

Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV)

(M. Raunet et K. Naudin, septembre 2006)
Disponible aussi en anglais

Pourquoi faut-il investir en zones arides ?

(M. Requier-Desjardins, juin 2007)
Disponible aussi en anglais

Sciences et société civile dans le cadre de la lutte contre la désertification

(M. Bied-Charreton et M. Requier-Desjardins, septembre 2007)
Disponible aussi en anglais

La restauration du capital naturel en zones arides et semi-arides Allier santé des écosystèmes et bien-être des populations

(M. Lacombe et J. Aronson, mars 2008)
Disponible aussi en anglais

Une méthode d'évaluation et de cartographie de la dégradation des terres. Proposition de directives normalisées

(P. Brabant, août 2010)
Disponible aussi en anglais

Pastoralisme en zone sèche.

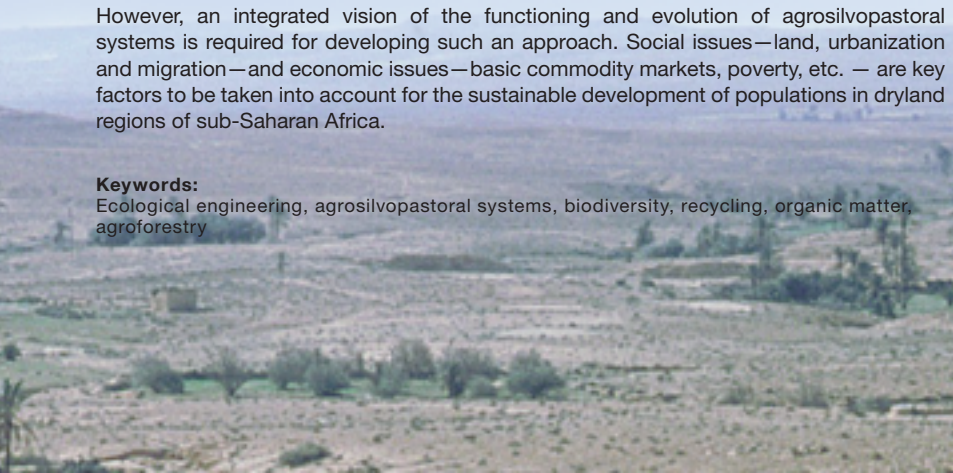
Le cas de l'Afrique subsaharienne
(B. Toutain, A. Marty, A. Bourgeot, A. Ickowicz et P. Lhoste, février 2012)
Disponible aussi en anglais

Le carbone dans les sols des zones sèches. Des fonctions multiples indispensables

(M. Bernoux et T. Chevallier, décembre 2013)
Disponible aussi en anglais

L'ingénierie écologique pour une agriculture durable dans les zones arides et semi-arides d'Afrique de l'Ouest.

(D. Masse, J.-L. Chotte et E. Scopel, septembre 2015)
Disponible aussi en anglais





Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

1 rue Descartes
75231 Paris CEDEX 05
France
Tél. +33 (0)1 55 55 90 90
www.enseignementsup-recherche.gouv.fr



Ministère des Affaires étrangères et du Développement international

27, rue de la Convention
CS 91533
75732 Paris CEDEX 15
France
Tél. +33 (0)1 43 17 53 53
www.diplomatie.gouv.fr



Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie

20 avenue de Ségur
75302 Paris 07 SP
France
Tél. +33 (0)1 42 19 20 21
www.ecologie.gouv.fr



Agence Française de Développement

5 rue Roland Barthes
75598 Paris CEDEX 12
France
Tél. +33 (0)1 53 44 31 31
www.afd.fr



Secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification

P.O. Box 260129
Haus Carstanjen
D-53153 Bonn
Allemagne
Tél. +49 228 815-2800
www.unccd.int



Agropolis International

1000 Avenue Agropolis
34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél. +33 (0)4 67 04 75 75
www.agropolis.fr

NOUS CONTACTER



CSFD

Comité Scientifique
Français de la Désertification
Agropolis International
1000 Avenue Agropolis
F-34394 Montpellier CEDEX 5
France
Tél.: +33 (0)4 67 04 75 44
Fax: +33 (0)4 67 04 75 99
csfd@agropolis.fr
www.csf-desertification.org

Suivez-nous sur

facebook

twitter
twitter.com/csf_fr

Photos de couverture

1 : Jachère en savane sèche du Burkina Faso. Paysage de jeunes jachères sous parc arboré en saison sèche.
A. Fournier © IRD
2 : Récolte du fonio en Guinée.
© A. Barnaud
3 : Zébus pâturant en saison sèche, Hautes Terres de Madagascar.
© O. Husson

