

AGROFORESTERIE ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES EN ZONE TROPICALE

Josiane Seghieri et Jean-Michel Harmand, coordinateurs



Chapitre 12

Les cultures vivrières associées aux arbustes natifs : un modèle adapté au climat sahélien

CHAPUIS-LARDY L., BADIANE NDOUR N.Y., ASSIGBETSE K., DIÉDHIYOU I.,
BALAYA R., Cournac L., FOUNOUNE-MBOUP H., MC SPADDEN GARDENER B.,
GHEZZEHEI T., JOURDAN C., BRIGHT M.B., BOGIE N., DEBENPORT S.,
DELAY C., DIAKHATÉ S., SAMBOU D.M. ET DICK R.P.

Résumé. Basé sur des cas d'étude au Sénégal, ce chapitre dresse le bilan de 15 années de recherches sur le fonctionnement des sols d'agrosystèmes associant plantes cultivées (mil-arachide) et arbustes natifs au Sahel. Les travaux, publiés pour la plupart, ont montré que *Guiera senegalensis* et *Piliostigma reticulatum* redistribuent l'eau dans le sol, stimulent les microorganismes du sol et génèrent des îlots de fertilité au bénéfice de la culture associée. Ainsi, les rendements des cultures sont augmentés, y compris en absence de fertilisants : jusqu'à +137% pour le mil en présence de *P. reticulatum* à Nioro-du-Rip. Cela justifie l'intérêt de maintenir ces arbustes dans les champs en appliquant une gestion agroécologique.

Abstract. Based on Senegalese case-studies, this chapter synthetize 15-years of research on the soil functioning of native shrub intercropping systems in the Sahel. Scientifically validated results showed that *Guiera senegalensis* and *Piliostigma reticulatum* perform water redistribution within soil profile, affect soil microbial communities and their activities and act as resource islands. Intercropping with woody shrubs resulted in a significant increase in crop yield: up to +137% yields for millet associated with *P. reticulatum* at Nioro-du-Rip. The beneficial effects for the associated crops raise interest for developing shrub-based agro-ecological systems.

► Introduction

Dans le Sahel, les pratiques agricoles traditionnelles intègrent le risque climatique propre aux zones arides et semi-arides : pluviométrie limitée et concentrée sur quelques mois. Toutefois, l'intensification écologique propose aux agriculteurs des voies d'adaptation à la variabilité interannuelle plus prononcée des précipitations, aux événements extrêmes de plus en plus fréquents (Seneviratne *et al.*, 2012) ou aux évolutions actuelles des sociétés (Masse *et al.*, 2013).

Les arbres et arbustes font partie intégrante du paysage agraire subsaharien. Aux côtés des traditionnels parcs arborés, *Guiera senegalensis* J.F. Gmel (Combretaceae) et *Piliostigma reticulatum* D.C. Hochst (Caesalpinioideae), deux arbustes natifs, sont souvent maintenus dans les champs pour de nombreux usages : bois de chauffe, médecine traditionnelle et artisanat (Yelemou *et al.*, 2007 ; Hernandez *et al.*, 2015). Les paysans d'Afrique subsaharienne commencent à préparer leurs champs pour les cultures annuelles avant les premières pluies ; les arbustes sont alors coupés au ras-du-sol pour faciliter le semis. Traditionnellement dans le bassin arachidier du Sénégal, les tiges de diamètre supérieur au centimètre sont récoltées pour être utilisées comme bois de chauffe. Le reste des résidus de coupe est brûlé sur place, fournissant ainsi au sol des éléments minéraux. Une alternative au brûlis consiste à utiliser les résidus du recépage pour constituer un paillis à la surface du sol (*mulch*), comme cela est parfois pratiqué dans certaines régions du Niger et du Burkina Faso. L'arbuste repousse ensuite au cours de la saison lorsque la culture est installée (Lahmar *et al.*, 2012 ; fig. 12.1).

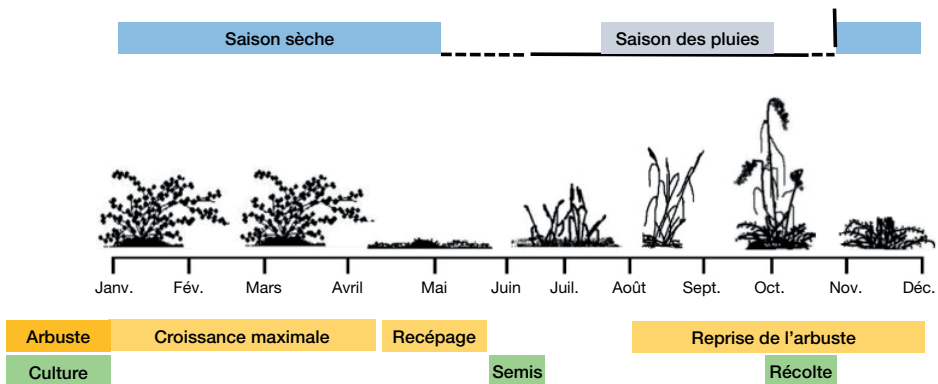


Figure 12.1. Gestion de l'arbuste par recépage et paillis dans les systèmes agroforestiers associant arbustes locaux et céréales en Afrique de l'Ouest (Lahmar *et al.*, 2012).

Bien que l'on retrouve *G. senegalensis* et *P. reticulatum* dans les paysages soudano-sahéliens et soudaniens de la côte atlantique (Mauritanie et Sénégal) jusqu'à la mer Rouge (Soudan et Érythrée), ce chapitre se focalise sur les résultats des travaux portant sur ce mode de gestion agroécologique (recépage et paillis) de ces deux arbustes au Sénégal. Ces travaux s'inscrivent dans une dynamique de quinze années de recherches menées en partenariat par des équipes sénégalaises, américaines et françaises, avec le soutien de la National Science Fondation.

► Des rendements améliorés

Dispositifs expérimentaux

Deux sites d'étude où prédomine l'un des deux arbustes dans le paysage ont été choisis :

- *Guiera senegalensis* (Gs) à Keur Matar dans le centre-ouest du Sénégal, près de Thiès;
- *Piliostigma reticulatum* (Pr) à Nioro-du-Rip dans le sud du bassin arachidier en zone plus humide.

À Keur Matar, le sol, très sableux et lessivé, est classé dans le type arenosol par la FAO (2006) et considéré comme un sol «*dior*» dans la classification locale (Badiane *et al.*, 2000). À Nioro-du-Rip, le sol est de type lixisol, localement appelé *deck-Dior*.

Sur ces deux sites, l'Institut sénégalais de recherches agricoles (Isra) a mis en place des essais expérimentaux en 2003.

Dans ces essais, la densité des arbustes a été augmentée et homogénéisée : 1200-1500 touffes arbustives/ha au lieu de quelques centaines en milieu paysan. Dans ces dispositifs, l'arbuste est associé, les années impaires, à une culture de mil (*Penisetum glaucum*) en rotation, les années paires, avec l'arachide (*Arachis hypogea*) ; les résidus de coupe sont restitués au sol.

Ces systèmes d'association culture-arbuste sont comparés à une culture pure, sans arbuste ni mulch. Ces dispositifs sont en blocs aléatoires complets et parcelles divisées (*split plot*).

Ils comprennent également des apports différenciés d'engrais commerciaux : 0 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 fois les doses NPK recommandée localement. Les apports recommandés sont :

- pour l'arachide, apport après germination de 9kg N, 30kg P et 15kg K/ha de NPK 6-20-10);
- pour le mil, apport au semis de 22,5kg N, 15kg P et 15kg K/ha de NPK 15-15-15, puis 2 fois 23kg N/ha urée apporté 2 et 4 semaines après le semis.

Croissance de la culture associée et rendement

Cette gestion écologique permet l'amélioration de la croissance de la culture, notamment une réduction de la durée du cycle de développement (Balaya *et al.*, 2017). Elle permet également un gain de productivité (biomasse et grains ; indice de surface foliaire et indice de végétation normalisé) des cultures annuelles associées à l'arbuste (Dossa *et al.*, 2013 ; Diakhaté *et al.*, 2013 ; Debenport *et al.*, 2015 ; Bright *et al.*, 2017 ; Bogie *et al.*, 2019).

Dans le cas de *P. reticulatum* à Nioro-du-Rip, les rendements sont significativement augmentés, y compris pour les systèmes sans apport de fertilisants minéraux : jusqu'à +137% en 2013 pour le mil et +39% en 2014 pour l'arachide (tab. 12.1 ; Bright *et al.*, 2017). L'apport d'engrais minéral apparaît même assez discutable.

Tableau 12.1. Rendements en arachide et en mil cultivés en association avec *P. reticulatum* (+ Pr) ou en absence d'arbuste (- Pr) à Nioro-du-Rip entre 2011 et 2015 (Bright *et al.*, 2017).

Apports NPK (× dose recommandée)	Mil (rendement en grains kg/ha)						Arachide (rendement en gousses kg/ha)			
	2011		2013		2015		2012		2014	
	+ Pr	- Pr	+ Pr	-Pr	+ Pr	- Pr	+ Pr	- Pr	+ Pr	-Pr
0	886a	499b	749a	315b	592a	298a	1672a	1354a	1526a	1096b
0,5	1429a	1047b	1194a	847a	1198a	738b	1713a	1763a	1380a	1204a
1,0	1806a	1457a	1375a	1402a	1565a	1151b	1710a	1837a	1237a	1137a
1,5	2302a	1939a	1675a	1502a	2022a	1388b	1812a	1794a	1384a	1135a

Les lettres a et b indiquent une différence significative au seuil de 5 %.

► Une utilisation de l'eau optimisée

À l'augmentation des rendements, est associée une augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau issue des précipitations (mesurée en kg de grains/ha/mm de précipitation; Dossa *et al.*, 2013; Bright *et al.*, 2017; Bogie *et al.*, 2019).

Ainsi, à Nioro-du-Rip par exemple, l'association avec *P. reticulatum* a permis en moyenne une augmentation de 36 % de l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante cultivée de 2005 à 2015 (Bright *et al.*, 2017). L'humidité du sol décroît avec la profondeur et la distance à l'arbuste. Les teneurs en eau du sol au point de flétrissement sont supérieures sous la touffe arbustive de *G. senegalensis* (Bogie *et al.*, 2018a). Les mesures effectuées (suivi des variables climatiques, du potentiel hydrique du sol, micro-lysimètres) depuis le début des années 2000 montrent qu'il n'y a pas de compétition pour l'eau entre la plante cultivée et l'arbuste. De plus, l'arbuste favorise la recharge de la nappe en saison des pluies et limite le ruissellement et l'évaporation (Kizito *et al.*, 2006, 2007 et 2012). Des observations complémentaires révèlent la capacité de ces arbustes à redistribuer l'eau dans le sol durant la nuit au profit des horizons de surface, c'est un phénomène de redistribution hydraulique (Kizito *et al.*, 2006, 2007 et 2012). Le potentiel hydrique des sols est modifié selon une périodicité de 24 h (Ψ s de 0,6 à 1,1 MPa), en phase avec l'inversion des flux de sève dans les racines latérales superficielles de l'arbuste entre le jour et la nuit (Kizito *et al.*, 2017).

À Keur Matar, une expérimentation avec marquage isotopique au deutérium de l'eau conduite de début mars à fin mai, en contre-saison (avec irrigation), révèle que l'eau « marquée » prélevée à un mètre de profondeur par les racines de *G. senegalensis* est redistribuée au profit de la culture associée ($\delta D > 300 \text{ ‰}$ dans les parties aériennes du mil; Bogie *et al.*, 2015. Ghezzehei *et al.*, 2017; Bogie *et al.*, 2018b).

► Une dynamique racinaire particulière

Les dynamiques racinaires de systèmes associant *G. senegalensis* et le mil ont été suivies entre 2013 et 2015 dans un dispositif expérimental complémentaire utilisant des rhizotrons. Ce dispositif était mis en place par le projet Safse à Keur Matar

(fig. 12.2; Bright, 2017). Avec un système racinaire se développant plus près de la surface par rapport à celui des arbustes, le mil profite pleinement des précipitations en saison de pluies.

Comme attendu, les taux d'allongement racinaire du *G. senegalensis* ont été plus élevés en saison humide qu'en saison sèche. Cette différence intersaisonnière a été particulièrement marquée chez les jeunes semis de *G. senegalensis* et chez les arbustes recépés. De façon inattendue, lorsque les racines du mil se sont développées en saison des pluies, la croissance des racines de l'arbuste associé au mil a été fortement réduite (voire nulle en surface), comparativement à celle observée pour l'arbuste seul. Cependant, cet arrêt de croissance des racines du *G. senegalensis* est temporaire, un mois seulement, et fait suite à un recépage total de ses parties aériennes intervenu un mois et demi plus tôt (Cournac *et al.*, 2017). Dans l'association culturale, l'arbuste et le mil n'explorent donc pas au même moment les horizons qu'ils exploitent tous les deux dans le profil de sol. Les racines du mil, qui se développent plutôt en surface, tirent profit de cette absence de compétition en ayant accès plus facilement aux éléments nutritifs issus de la minéralisation des résidus restitués à la surface du sol au moment du recépage. Enfin, par le recépage, les agriculteurs réduisent la compétition entre les arbustes et les cultures au moment du semis et, en même temps, ce système favorise la croissance et le rendement des cultures.

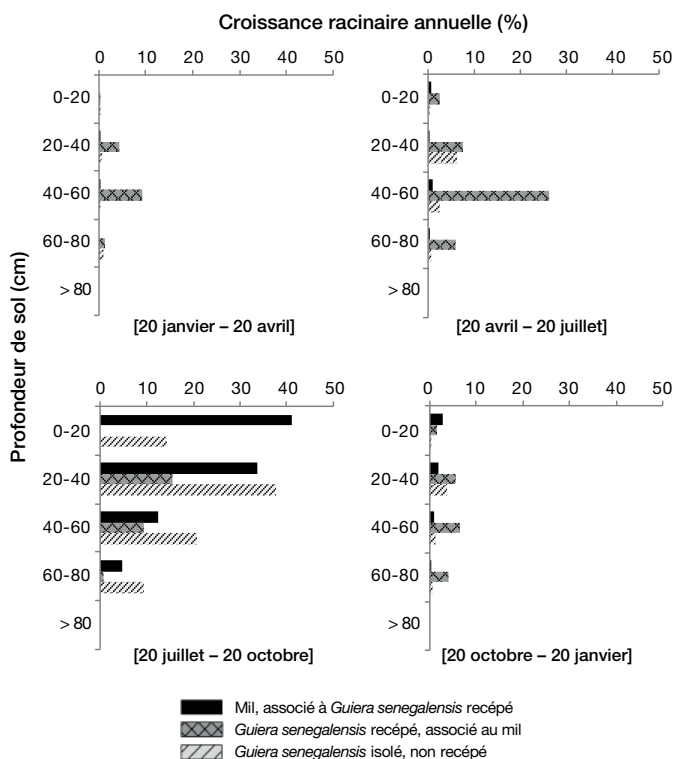


Figure 12.2. Dynamique racinaire moyenne (2013-2015), exprimée en % de croissance racinaire annuelle sur tout le profil, de touffes de *G. senegalensis* recépées, du mil poussant à proximité et de touffes isolées et non-recépées (n=3, Keur Matar).

►► Un îlot de fertilité

La gestion, en particulier la taille de l'arbuste dans le système cultivé, permet de préparer un paillis à la surface du sol. Ce paillis, composé des résidus de recépage de l'arbuste, ne limite pas seulement les pertes d'eau. Il constitue une source de carbone et contribue, à travers sa décomposition, à la fourniture de nutriments (Dossa *et al.*, 2009; Diédhiou *et al.*, 2009; Dick *et al.*, 2010). Les plantes cultivées installées à proximité de l'arbuste tirent parti de cet «îlot de fertilité».

Dans les parcelles de mil cultivées en présence de l'arbuste, avec paillis de *G. senegalensis* à Keur Matar et *P. reticulatum* à Nioro-du-Rip, les teneurs en carbone dans l'horizon superficiel du sol augmentent en moyenne de 11 % (*P. reticulatum*) à 127 % (*G. senegalensis*) entre 2012 et 2015 (Bright *et al.*, 2017), notamment au travers des teneurs en matière organique particulaire (fraction de carbone aisément minéralisable de taille > 50 µm). Toutefois, la décomposition et la minéralisation de cette matière organique varient en fonction de la composition des résidus de l'arbuste (rapport C/N, teneurs en polyphénols, lignine, hémicellulose et cellulose; Diédhiou *et al.*, 2009; Diédhiou-Sall *et al.*, 2013). Il est intéressant de noter que les teneurs en nutriments, notamment N, K, Ca et Mg, sont significativement plus élevées dans les sols de l'association culturale, aussi bien en présence de *G. senegalensis* que de *P. reticulatum* (Bright *et al.*, 2017). L'effet de la présence des arbustes est aussi notable durant la saison culturale sur les fractions assimilables par la plante (azote minéral et phosphates).

►► Un système cultivé favorable aux organismes du sol

L'importance quantitative et qualitative des communautés microbiennes (bactériennes et fongiques) du sol dans la fourniture des éléments nutritifs pour la plante est connue et largement mentionnée dans la littérature. Nous avons appréhendé cet aspect par diverses méthodes courantes en écologie microbienne des sols.

Diversité et structure des communautés microbiennes du sol

L'analyse des phospholipides, composants essentiels des membranes des cellules microbiennes extraits des échantillons de sols sous la forme d'acides gras phospholipidiques (PLFA), a permis de faire une différenciation phénotypique des microorganismes du sol en fonction de la distance à l'arbuste (Diédhiou-Sall *et al.*, 2009). Cette étude a également montré que la biomasse microbienne du sol reste active durant la saison sèche à proximité de l'arbuste (Dick *et al.*, 2017). La structure des communautés microbiennes des échantillons de sol collectés dans les dispositifs de Keur Matar et de Nioro-du-Rip a également été analysée par DGGE¹.

Ces analyses ont permis de discriminer les effets de la présence de l'arbuste et de mettre en valeur le lien entre la structure des communautés microbiennes et certains

1. DGGE ou *Denaturing gradient gel electrophoresis*, électrophorèse sur gel en gradient dénaturant : c'est une technique de détermination d'empreintes moléculaires des fragments de gènes ribosomiques codant pour l'ADNr 16S pour les communautés bactériennes et l'ADNr 18S ou la région de l'espaceur intergénique transcrit (ITS) pour les communautés fongiques.

paramètres chimiques du sol, notamment les teneurs en azote minéral (Debenport *et al.*, 2015 ; Diakhaté *et al.*, 2016).

Une grande biodiversité des communautés bactériennes et fongiques est observée dans la rhizosphère du mil, lorsqu'il est cultivé dans le système agroforestier plutôt qu'en monoculture (Debenport *et al.*, 2015 ; Diakhaté *et al.* 2016). Les analyses phylogénétiques permettent de distinguer des taxons mieux adaptés ou plus sensibles aux conditions édaphiques rencontrées dans l'association culturale mil+arbuste pour laquelle les teneurs en carbone et éléments nutritifs dans le sol sont plus élevées (Debenport *et al.*, 2015).

De plus, des plants de mil (50 jours après semis) ont été échantillonnés à proximité (< 1 m) ou à distance (> 5 m) d'un buisson de *G. senegalensis*, le long du gradient climatique nord-sud du bassin arachidier sénégalais (Louga, Bambey et Nioro-du-Rip). La colonisation des racines de mil par les mycorhizes à arbuscules (AMF) est plus abondante à proximité de l'arbuste, notamment pour les sites du nord, aux sols plus sableux et recevant des précipitations plus faibles (Bright *et al.*, 2014). Une expérimentation en mésocosmes réalisée sous serre a permis de vérifier que la présence de *G. senegalensis* favorise la croissance du mil par le biais d'un réseau de mycélium partagé favorisant le transfert des nutriments et de l'eau (Dick *et al.*, 2015).

Capacités fonctionnelles des microorganismes

Les données obtenues sur la structure et la diversité des communautés peuvent être confrontées à d'autres paramètres renseignant sur les capacités fonctionnelles des microorganismes.

Les analyses réalisées sur les échantillons de sols issus des dispositifs expérimentaux de Keur Matar et Nioro-du-Rip entre 2011 et 2016 montrent que dans le sol cultivé en association avec les arbustes, les activités enzymatiques (uréase, arylsulphatase et deshydrogénase) sont plus élevées qu'en culture pure. Elles confirment l'existence d'une activité microbienne et d'un recyclage des nutriments plus importants dans le sol cultivé en association avec les arbustes que dans celui d'une monoculture (Diakhaté *et al.*, 2016).

La méthode MicroResp™ permet de caractériser l'activité respiratoire des microorganismes après l'apport d'un substrat particulier considéré comme plus ou moins dégradé (Campbell *et al.*, 2003). Pour les échantillons de sols du dispositif de Nioro-du-Rip, les profils d'activité catabolique obtenus par cette méthode révèlent deux aspects intéressants ouvrant de nouvelles pistes de recherche pour la gestion de cet arbuste dans le champ cultivé (Diakhaté *et al.*, 2016) :

- l'apport des résidus de *P. reticulatum* stimule les communautés microbiennes à même de dégrader les composés phénoliques dérivés de la lignine ;
- en présence de l'arbuste, les communautés microbiennes du sol dégradent plus efficacement le tréhalose. Ce carbohydrate est impliqué notamment dans l'efficacité d'utilisation de l'eau par la plante (Delorge *et al.*, 2014). Il joue également un rôle clé dans les interactions entre la plante et les microorganismes du sol, notamment comme molécule-signal dans le dialogue moléculaire avec les microorganismes symbiotiques ou les pathogènes (Fernandez *et al.*, 2010).

Les nématodes, indicateurs du fonctionnement biologique du sol

Du fait de leur abondance dans les sols et de leur diversité fonctionnelle (en lien avec leur régime alimentaire et leur stratégie démographique), les nématodes constituent un autre indicateur de choix permettant d'apprécier les changements du fonctionnement biologique du sol liés aux pratiques agricoles (Bongers et Ferris, 1999).

Dans la monoculture du mil à Nioro-du-Rip, la communauté de nématodes du sol est dominée par les nématodes phytoparasites (60% de l'abondance totale; Diakhaté *et al.*, 2013), notamment les nématodes spiralés du genre *Helicotylenchus* ou *Scutellonema* (Hoplolaimidae). Leur abondance diminue significativement dans l'association culturale, que ce soit en milieu paysan (Diakhaté *et al.*, 2013) ou en conditions contrôlées (Chapuis-Lardy *et al.*, 2015). L'abondance de la population de nématodes phytophages est réduite de 64% quarante-cinq jours après un apport de feuilles ou de rameaux broyés.

La production de composés phénoliques nématocides lors de la dégradation des résidus de plantes ligneuses est un mécanisme suppressif des populations de nématodes phytophages connu pour d'autres espèces de plantes (Ohri et Pannu, 2010). La présence de polyphénols (Dossa *et al.*, 2009), de flavonols et d'oxychromones (Babajide *et al.*, 2008) chez *P. reticulatum* pourrait ainsi être à l'origine de la réduction de l'abondance des nématodes phytophages observée en présence de l'arbuste. Cependant, cette hypothèse reste à confirmer et les quantités à apporter pour maximiser le service de contrôle des nuisibles sans impacter négativement la production de la culture associée restent à déterminer. Il faudra étudier les éventuelles conséquences du potentiel allélopathique ou de l'inhibition de la nitrification, liés à un excès de polyphénols.

Par ailleurs, *P. reticulatum* favorise la prolifération des nématodes bactérivores, notamment les familles Cephalobidae et Rhabditidae (Diakhaté *et al.*, 2013). Cette augmentation de l'abondance relative des nématodes bactérivores se traduit par une valeur plus élevée de l'indice d'enrichissement dans l'association culturale comparativement à la monoculture de mil (Diakhaté *et al.*, 2013). Cet indice fournit des informations sur la disponibilité en ressources dans le sol au travers de la réponse des décomposeurs primaires, notamment les espèces opportunistes (Ferris *et al.*, 2001). L'indice d'enrichissement augmente avec la disponibilité des éléments nutritifs, en particulier l'azote. Ce résultat est en adéquation avec l'augmentation des teneurs en azote minéral observées dans le sol : 8,1 mg N/kg de sol de l'association culturale; 4,7 mg N/kg de sol dans la monoculture de mil (Diakhaté *et al.*, 2013). La dégradation des résidus de l'arbuste contribue sans aucun doute à une augmentation des teneurs en azote minéral. Toutefois, l'abondance des nématodes bactérivores, notamment des Rhabditidae, indique clairement un effet de prédation sur les microorganismes (Bongers et Ferris, 1999) qui conduit au recyclage de l'azote microbien immobilisé (Neher, 2010).

► Vers un modèle d'association de cultures vivrières et d'arbustes natifs adapté au climat sahélien

Pour les systèmes associant arbustes et cultures annuelles, les travaux menés ces quinze dernières années au Sénégal ont permis de démontrer que la présence des

arbustes dans l'agrosystème, leur recépage et le maintien des résidus de coupe à la surface du sol permettaient une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et la création d'îlots de fertilité favorisant un meilleur rendement des cultures. Ces systèmes abritent des niches écologiques propices au développement de communautés microbiennes (bactéries et champignons) impliquées dans la fourniture d'éléments nutritifs à la culture qui lui est associée. Cette mise à disposition d'éléments nutritifs permet ainsi une meilleure croissance et la régulation de certains bioagresseurs, notamment des nématodes phytophages.

Considérant l'aire de répartition géographique de ces arbustes en zone subsaharienne, l'intensification de leur utilisation dans les champs cultivés devrait permettre d'améliorer la productivité primaire (production de biomasse par unité de temps ou de la production primaire, notamment via la photosynthèse) et le rendement des cultures de manière durable. Pour être proposée, une telle démarche agro-écologique doit intégrer les connaissances, les pratiques et les ressources locales. Des travaux ultérieurs devraient permettre d'explorer — dans d'autres contextes pédoclimatiques, agronomiques et socio-économiques, mais aussi au niveau de l'agroécosystème et de l'exploitation agricole — les bénéfices et les inconvénients pour les cultures associées et pour les exploitants (Lahmar et Chapuis-Lardy, 2015).

►► Remerciements

Les travaux ont été menés dès le début des années 2000, grâce au soutien de la National Science foundation (projet n° 0 120 732), et avec la contribution de nombreux étudiants et chercheurs de 2001 à 2008 : †A. Sène et †M. Khouma (Isra, Sénégal), M. Sène (Isra, Sénégal), S. Diédhiou-Sall (Université de Ziguinchor, Sénégal), A. Samba (Université de Thiès, Sénégal), A. Badiane (Usaid, Sénégal), J. Noller et M. Dragila (Oregon State University, États-Unis), F. Kizito (Ciat, Rwanda), A. Lufafa (Banque mondiale, Ouganda), E. Dossa (IFDC, Ghana).

Les recherches se sont ensuite poursuivies grâce au soutien renouvelé de la National Science foundation (projet n° 0 968 247 (2010-2017), épaulée par le programme Safse, en impliquant les chercheurs et étudiants co-auteurs du présent chapitre.

►► Bibliographie

- Babajide J.O., Babajide O.O., Daramola A.O., Mabusela W.T., 2008. Flavonols and an oxychromonol from *Piliostigma reticulatum*. *Phytochemistry*, 69: 2245-2250.
- Badiane A.N., Khouma M., Sene M., 2000. Région de Diourbel : gestion des sols. *Drylands research working paper* 15, Drylands research, Somerset, Rotaume-Uni. www.drylandsresearch.org.uk/pdfs/WP_Badiane_Soils.pdf (consulté le 31 mai 2017).
- Balaya R., Bogie N.A., Diedhiou I., Diop A.K., Badji B., Ndiaye M.B., Diallo D., Gaye F., Ndour Badiane Y., 2017. Effect of *Guiera senegalensis* intercropping on pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) growth and yield in Senegal. In : *Shrub intercropping symposium, (Sustainable intensification conference)* Conférence intensification durable, 27 avril 2017, Dakar Sénégal.
- Bogie N., Bayala R., Diedhiou I., Fogel M., Dick R., Ghezzehei T.A., 2015. Isotopic tracer study of hydraulic transfer between native woody shrubs and associated annual crops under dry conditions in the Sahel. *Geophysical research abstract*, 17: EGU2015-7609.

- Bogie N.A., Bayala R., Diedhiou I., Dick R.P., Ghezzehei T.A., 2018a. Alteration of soil physical properties and processes after ten years of intercropping with native shrubs in the Sahel. *Soil and tillage research*, 182: 153-163.
- Bogie N.A., Bayala R., Diedhiou I., Dick R.P., Conklin M.H., Fogel M.L., Ghezzehei T.A., 2018b. Hydraulic redistribution by native Sahelian shrubs: Bioirrigation to resist in-season drought. *Frontiers in environmental science*, 6: 98. doi: 10.3389/fenvs.2018.00098.
- Bogie N.A., Bayala R., Diedhiou I., Dick R.P., Ghezzehei T.A., 2019. Intercropping with two native woody shrubs improves water status and development of interplanted groundnut and pearl millet in the Sahel. *Plant and soil*, 435: 143-159.
- Bongers T., Ferris H., 1999. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in ecology and evolution*, 14: 224-228.
- Bright M.B.H., Dick R.P., Schreiner P., Mboup Founoune H., Chapuis-Lardy L., 2014. Arbuscular mycorrhizal colonization rate dynamics in a *Guiera senegalensis*-Millet agroforestry intercropping system across a rainfall gradient of Senegal. In: *ASA-CSSA-SSSA International annual meeting*, Long Beach (CA, États-Unis), November 2-5. The American society of agronomy, Crop science society of America, and Soil science society of America. Long Beach: ASA-CSSA-SSSA.
- Bright M.B.H., Diedhiou I., Bayala R., Assigbetse K., Chapuis-Lardy L., Ndour Y., Dick R.P., 2017. Long-term *Piliostigma reticulatum* intercropping in the Sahel: crop productivity, carbon sequestration, nutrient cycling, and soil quality. *Agriculture, ecosystems and environment*, 242: 9-22.
- Bright M.B.H., 2017. The role of shrub agroforestry systems in increasing food security for the West African Sahel. Doctor of Philosophy, Ohio State University, Environment and natural resources.
- Campbell C.D., Chapman S.J., Cameron C.M., Davidson M.S., Potts J.M., 2003. A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Applied and environmental microbiology*, 69: 2593-3599.
- Chapuis-Lardy L., Diakhaté S., Djigal D., Ba A.O., Dick R.P., Sembène P.M., Masse D., 2015. Potential of Sahelian native shrub materials to suppress the spiral nematode *Helicotylenchus dihystrera*. *Journal of nematology*, 47: 214-217.
- Cournac L., Jourdan C., Moucty Sambou D., Bayala R., Diédhiou I., Bright M., Dick R., 2017. *Guiera senegalensis* Intercropping with *Pennisetum glaucum*: temporal and spatial dynamics of shrub and millet. In : *Shrub Intercropping symposium, (Sustainable intensification conference)* Conférence intensification durable, 27 avril 2017, Dakar, Sénégal.
- Debenport S.J., Assigbetse K.B., Bayala R., Chapuis-Lardy L., Dick R.P., McSpadden Gardener B.B., 2015. Shifting populations in the root-zone microbiome of millet associated with enhanced crop productivity in the Sahel. *Applied and environmental microbiology*, 81: 2841-2851.
- Delorge I., Janiak M., Carpentier S., Van Dijck P., 2014. Fine tuning of trehalose biosynthesis and hydrolysis as novel tools for the generation of abiotic stress tolerant plants. *Frontiers in plant science*, 5: a147.
- Diakhaté S., Gueye M., Chevallier T., Diallo N.H., Assigbetse K., Masse D., Sembène M., Ndour Y., Dick R.P., Chapuis-Lardy L., 2016. Soil microbial functional capacity and diversity in a millet-shrub intercropping system of semi-arid Senegal. *Journal of arid environments*, 129: 71-79.
- Diakhaté S., Villenave C., Diallo N.H., Ba A.O., Djigal D., Masse D., Sembène P.M., Chapuis-Lardy L., 2013. The influence of a shrub-based intercropping system on the soil nematofauna when growing millet in Senegal. *European journal of soil biology*, 57: 37-41. [http://csa2015.cirad.fr/var/csa2015/storage/fckeditor/file/L1%20Regional%20Dimensions\(1\).pdf](http://csa2015.cirad.fr/var/csa2015/storage/fckeditor/file/L1%20Regional%20Dimensions(1).pdf) (consulté le 08/04/2019).
- Dick R.P., Diédhiou I., Dossa E., Kizito F., Chapuis-Lardy L., Ndour Badiane Y., Debenport S.J., McSpadden Gardener B.B., Assigbetse K.B., Bright M.B.H., Schreiner P., Founoune Mboup H., Bayala R., Diallo N.H., 2015. Optimizing rhizosphere microbiology and hydrology of shrub-intercropping for buffering climate change in the Sahel. In: *3^e Conférence scientifique mondiale sur l'Agriculture Climato-Intelligente*, 16-18 mars 2015.
- Dick R.P., Diedhiou-Sall S., DeLay C., Assigbetse K.B., Badiane A., Khouma M., Diedhiou I., Chapuis-Lardy L., Dossa E., 2017. Soil microbial function and profile diversity in the rhizosphere of two indigenous shrubs of the Sahel. In: *Shrub intercropping symposium, (Sustainable intensification conference)* Conférence intensification durable, 27 avril 2017, Dakar, Sénégal.

- Dick, R., Sene, M., Diack, M., Khouma, M., Badiane, A., Samba, S. A., Diedhiou I., Lufafa A., Dossa E., Kizito F., Diedhiou S., Noller J., Dragila, M. 2010. The native shrubs *Piliostigma reticulatum* and *Guiera senegalensis*: the unrecognized potential to remediate degraded soils and optimize productivity of Sahelian agroecosystems. In: *Le projet majeur africain de la Grande muraille verte: concepts et mise en œuvre*. Dia A. et Duponnois R., (eds). Paris : Éditions IRD, 199-213. doi :10.4000/books.irdeditions.2126 (consulté le 31 mai 2017).
- Diedhiou S., Dossa E.L., Badiane A.N., Diedhiou I., Sene M., Dick R.P., 2009. Decomposition and spatial microbial heterogeneity associated with native shrubs in soils of agroecosystems in semi-arid Senegal. *Pedobiologia*, 52: 273-286.
- Diedhiou-Sall S., Dossa E.L., Badiane A.N., Assigbetse K.B., Diedhiou I., Ndiaye N.A.S., Khouma M., Sène M., Dick R.P., 2013. Microbiology and macrofaunal activity in soil beneath shrub canopies during residue decomposition in agroecosystems of the Sahel. *Soil science society of america journal*, 77: 501-511.
- Dossa E.L., Diedhiou I., Khouma M., Sene M., Badiane A.N., Samba Ndiaye S.A., Assigbetse K.B., Sall S., Lufafa A., Kizito F., Dick R.P., Saxena J., 2013. Crop productivity and nutrient dynamics in a shrub-based farming system of the Sahel. *Agronomy journal*, 105: 1 237-1 246.
- Dossa E.L., Khouma M., Diedhiou I., Sene M., Kizito F., Badiane A.N., Samba S.A.N., Dick R.P., 2009. Carbon, nitrogen and phosphorus mineralization potential of semiarid Sahelian soils amended with native shrub residues. *Geoderma*, 148: 251-260.
- FAO. 2006. *Guidelines for soil description*. 4th edition. Rome: FAO.
- Fernandez O., Béthencourt L., Quero A., Sangwan R.S., Clément C., 2010. Trehalose and plant stress responses: friend or foe? *Trends in plant science*, 15: 409-417.
- Ferris H., Bongers T., de Goede R.G.M., 2001. A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied soil ecology*, 18: 13-29.
- Ghezzehei T.A., Dick R.P., Bogie N., Sene M., Kizito F., Dragila M., Diedhiou I., 2017. Intercropped woody species in the Sahel to resist drought: hydraulic lift and crop water relations. In: *Shrub intercropping symposium, (Sustainable Intensification Conference)* Conférence intensification durable, 27 avril 2017, Dakar, Sénégal.
- Hernandez R.R., Debenport S.J., Ndoye F., Nkenmogne I.E.K., Thuita M., Leewis M.C.C.E., Soumare S., Gueye M., Miambi E., Chapuis-Lardy L., Diedhiou I., Dick R.P., 2015. The native shrub, *Piliostigma reticulatum*, as an ecological resource island for mango trees in the Sahel. *Agriculture, ecosystem and environment*, 204: 51-61.
- Kizito F., Dragila M., Sene M., Lufafa A., Diedhiou I., Dick R.P., Selker J.S., Diack M., Dossa E., Khouma M., Badiane A.N., Ndiaye S., 2006. Seasonal soil water variation and root patterns between two semi-arid shrubs co-existing with pearl millet in Senegal, West Africa. *Journal of arid environments*, 67: 436-455.
- Kizito F., Sene M., Dragila M., Lufafa A., Diedhiou I., Dossa E., Cuenca R., Selker J.S., Dick R.P., 2007. Soil water balance of annual crop-native shrub systems in Senegal's peanut basin: the missing link. *Agriculture and water management*, 90: 137-148.
- Kizito F., Sene M., Ghezzehei T.A., Dick R.P., Bogie N., Diedhiou I., Dragila M., 2017. Shrub-crop hydrology: water balance, competition and hydraulic redistribution. In : *Shrub Intercropping symposium, (Sustainable Intensification Conference)* Conférence intensification durable, 27 avril 2017, Dakar, Sénégal.
- Kizito F., Dragila M.I., Sene M., Brooks R.J., Meinzer F.C., Diedhiou I., Diouf M., Lufafa A., Dick R.P., Selker J., Cuenca R.H., 2012. Hydraulic redistribution by two semi-arid shrub species: implications for sahelian Agro-ecosystems. *Journal of arid environments* 83: 69-77.
- Lahmar R., Bationo B.A., Lamso N.D., Guero Y., Tittonell 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.
- Lahmar R., Chapuis-Lardy L., 2015. Les arbustes natifs dans les champs cultivés : un atout pour le développement de systèmes agroécologiques innovants et efficaces dans les zones sèches de l'Afrique. In: *Dossier thématique du CSFD n° 11, Masse D., Chotte J.L., Scopel E.*, (eds). Montpellier : Comité scientifique français de la désertification CSFD, Agropolis Fondation, 19-21.

Masse D., Ndour Badiane Y., Hien E., Akpo L.E., Assigbetsé K., Bilgo A., Diédhiou I., Hien V., Chapuis-Lardy L., 2013. L'agriculture africaine face aux changements globaux : recherches et innovations basées sur les sciences de l'écologie. *Comptes rendus biologies*, 336 : 289-294.

Neher D.A., 2010. Ecology of plant and free-living nematodes in natural and agricultural soil. *Annual reviews in phytopathology*, 48: 371-394.

Ohri P., Pannu S.K., 2010. Effect of phenolic compounds on nematodes – A review. *Journal of applied and natural science*, 2: 344-350.

Seneviratne S.I., Nicholls N., Easterling D., Goodess C.M., Kanae S., Kossin J., Luo Y., Marengo J., McInnes K., Rahimi M., Reichstein M., Sorteberg A., Vera C., Zhang X., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *In: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, *et al.* (eds). A Special report of working groups I and II of the Intergovernmental panel on climate change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, and New York, NY, États-Unis, 109-230.

Yelemou B., Bationo B.A., Yameogo G., Millogo-Rasolodimby J., 2007. Gestion traditionnelle et usages de *Piliostigma reticulatum* sur le plateau central du Burkina Faso. *Bois et forêts des tropiques*, 291 : 55-66.