

Renouvellement de la fertilité des sols dans les systèmes de culture à base de mil du Bassin Arachidier du Sénégal : Evolution et voies d'amélioration

**Toukara Adama^(1,4), Sarr Saer^(1,2), Ndiaye Malick⁽³⁾, Yolande Senghor⁽³⁾
et Camara Boubacar ⁽⁴⁾**

ado.toukara@gmail.com

1 : IFDC Sénégal, Immeuble Serigne Saliou Mbacké, 2e étage, en face station Shell, Route des Almadies, Ngor-Dakar, Sénégal

2 : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), Bureau d'analyses Macroéconomique (BAME), Bel air, route des hydrocarbures, Dakar, Sénégal

3 : Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA), CNRA de Bambey, B.P. 53 Bambey, Sénégal

4 : Université Assane SECK, Laboratoire d'Agroforesterie et d'Écologie (LAFE), Département d'Agroforesterie, UFR Sciences et Technologies, BP : 523, Ziguinchor, Sénégal

Résumé

Le système agraire traditionnel du Bassin Arachidier qui était caractérisé par l'intégration de l'agriculture-élevage, s'est transformé dans le temps. L'article a essayé de tracer cette évolution à travers une revue bibliographique. Cette évolution du système agraire est marquée par trois périodes. Au début du 19^e siècle, le système reposait sur la culture continue du mil précoce qui domine dans les champs de case où la fertilité est entretenue par l'épandage des déchets domestiques et le parage des troupeaux bovins en fin de saison sèche. Les champs de brousse étaient caractérisés d'une part, par les parcelles de mil à cycle long, et d'autre part par la jachère enclose pâturée pendant l'hivernage. La deuxième période durant la 1^{ère} moitié du 20^e siècle est marquée par l'introduction de la culture d'arachide dans les champs de brousse et le développement de la culture attelée. Cela a entraîné l'extension des surfaces cultivées et par conséquent la baisse progressive de la jachère et de l'espace pastoral. La situation s'est intensifiée dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle avec la quasi-disparition des pratiques traditionnelles de renouvellement de la fertilité des sols qui étaient basées sur l'intégration agriculture-élevage. Dans ce contexte, la durabilité du système passerait par le recours à des technologies adaptées de régénération des sols. L'article a suggéré ainsi, sur la base de travaux antérieurs, une série de technologies qui permettent de restaurer la fertilité de ces sols et assurer ainsi la durabilité de ces systèmes.

Mots clés : Bassin Arachidier, fertilité, fumier, système de culture, durabilité, techniques culturelles

Soil fertility renewal in millet-based cropping systems in the Groundnut Basin of Senegal: Evolution and ways of improvement

Abstract

The traditional agrarian system of the Groundnut Basin, which used to be characterized by the integration of agriculture and livestock, has been transformed over time. This article tried to trace this evolution through a bibliographic review. Its evolution is marked by three periods. At the beginning of the 19th century, the system was based on the continuous cultivation of early millet, which dominates the house-fields where fertility is maintained by spreading domestic waste and park cattle at the end of the dry season. The bush-fields are characterized, on the one hand, by long-cycle millet plots and, on the other hand, by enclosed fallow land grazed during the rainy season. The second period (first half of the 20th century) was marked by the introduction of peanut cultivation in the bush-fields and the development of the animal-draw. This led to the expansion of cultivated areas and, consequently, the gradual disappearance of fallow land and pastoral space. The situation intensified in the second half of the 20th century with the virtual disappearance of traditional soil fertility renewal practices that were based on the integration of agriculture and livestock. In this context, the sustainability of the system would depend on the use of adapted soil regeneration technologies.

Key words: Groundnut Basin, fertility, manure, crop system, sustainability, farming system

تجديد خصوبة التربة في نظم المحاصيل القائمة على الدخن في حوض الفول السوداني في السنغال: التطور وسبل التحسين

توكاما اداما، صار صيير، ندياي مليك، يولاند سينكور وكمارا بوبكار

ملخص

لقد تغير النظام الزراعي التقليدي لحوض الفول السوداني، والذي تميز بتكامل الزراعة والثروة الحيوانية، بمرور الوقت. حاول المقال تتبع هذا التطور من خلال مراجعة بيليوغرافية. تميز هذا التطور للنظام الزراعي بثلاث فترات. في بداية القرن التاسع عشر، كان النظام يعتمد على الزراعة المستمرة للدخن المبكر الذي يسود في الحقول حيث يتم الحفاظ على الخصوبة من خلال نشر النفايات المنزلية وحضائر قطعان الماشية في نهاية موسم الجفاف. تميزت حقول الأدغال من ناحية بقطع الدخن ذات الدورة الطويلة، ومن ناحية أخرى عن طريق المراعي المراحة المغلقة خلال موسم الأمطار. تميزت الفترة الثانية خلال النصف الأول من القرن العشرين بإدخال زراعة الفول السوداني في حقول الأدغال وتطوير الجر الحيواني. وقد أدى ذلك إلى اتساع رقعة المساحات المزروعة وبالتالي التدهور التدريجي للأراضي البور والمساحات الرعوية. اشتد الوضع في النصف الثاني من القرن العشرين مع الاختفاء الفعلي للممارسات التقليدية لتجديد خصوبة التربة، والتي كانت قائمة على التكامل بين الزراعة والثروة الحيوانية. في هذا السياق، ستتطلب استدامة النظام استخدام تقنيات تجديد التربة المناسبة. وهكذا اقترحت المقالة، على أساس الأعمال السابقة، سلسلة من التقنيات التي تجعل من الممكن استعادة خصوبة هذه التربة وبالتالي ضمان استدامة هذه النظم.

الكلمات المفتاحية: حوض الفول السوداني، الخصوبة، السماد الطبيعي، نظام الزراعة، الاستدامة، تقنيات الزراعة.

Introduction

Les rendements des céréales, aliments de base des populations du monde rural dans le Bassin Arachidier (BA), sont faibles et de l'ordre de 400 à 800 kg/ha (Gerard *et al.*, 2020), alors que le potentiel permis par le climat (rayonnement, température, précipitations) est de l'ordre 2400 à 3200 kg/ha avec les variétés actuelles (CEDEAO *et al.*, 2016). La faible disponibilité des nutriments des sols constitue un facteur limitant majeur de la production agricole dans ces agrosystèmes du BA (Affholder *et al.*, 2013 ; Toukara *et al.*, 2020).

La gestion de la fertilité des sols dans les systèmes de cultures (SC) à base de mil du BA repose sur le transfert de la fertilité par les produits organiques issus de l'élevage (parcage, fumiers) et des résidus domestiques. Ces produits organiques sont généralement apportés dans les champs de case (à proximité des habitations) et dans une moindre mesure dans les champs de brousse (plus éloignés) (Masse *et al.*, 2018). La fumure organique constitue ainsi la principale source de nutriments des cultures dans les parcelles (Audouin *et al.*, 2015). Cependant, la production de fumier est limitée et la qualité reste médiocre. La présence de *Faidherbia albida* qui est en général une espèce protégée sur les terres agricoles, contribue également à l'amélioration de la fertilité des sols (Badiane *et al.*, 2000a). Les travaux de Sileshi (2016) ont montré une augmentation du stock de carbone du sol (46%), de l'azote total (50%), du phosphore (21%), du potassium (32%) et des rendements de maïs (150%) et de sorgho (73%) sous couvert de *faidherbia albida* par rapport à la zone non couvert par l'arbre. L'utilisation d'engrais minéraux est relativement limitée dans ces agrosystèmes où la fertilité des sols a fortement diminué (Pieri, 1989 ; Toukara, 2021). Si en 1989, Pieri indiquait déjà la baisse de la fertilité des sols dans les zones rurales du BA, la situation semble être accentuée de nos jours (Toukara, 2021) dans un contexte de changement climatique et d'abandon ou de quasi-disparition des pratiques traditionnelles de renouvellement de la fertilité des sols (jachère, rotation culturale, intégration agriculture-élevage etc.). Dans ce contexte, la durabilité du système passerait par l'adoption de technologies qui permettraient la régénération des sols et par conséquent une augmentation de la productivité agricole.

Après avoir expliqué dans une première partie la méthodologie, dans la deuxième partie nous avons fait une brève présentation du BA. La troisième partie retrace l'évolution du système agraire du BA. La quatrième partie fait une description des systèmes de culture et de la gestion de la fertilité des sols et leurs impacts sur le fonctionnement des agrosystèmes. La cinquième partie présente les fumiers (qualité et quantité) utilisés par les agriculteurs du BA. Dans la dernière partie nous recommandons des pratiques adaptées de gestion de la fertilité des sols.

Moteur de recherche et documents consultés

Pour cette revue bibliographique, les moteurs de recherche « google » et « google scholar » ont été utilisés. Pour avoir des documents compatibles avec le sujet, les expressions suivantes ont été utilisées : Bassin Arachidier, fumure organique, système agraire, pratiques de gestion intégrée de la fertilité des sols etc. En plus de cela, des documents ayant trait au sujet traité disponibles dans les bibliothèques de l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) et de l'UASZ (Université Assane Seck de Ziguinchor) ont été utilisés. La sélection des documents retenus a été faite sur la

base du contexte de l'étude, de la zone d'étude et de la pertinence des résultats en rapport avec le sujet traité.

Bassin arachidier : situation géographique, activités agricoles et caractéristiques pédoclimatiques

La zone agro-écologique du Bassin Arachidier (BA) appartient en majorité à la zone Soudano sahélienne d'Afrique de l'Ouest. Elle représente environ 30% de la superficie nationale (CSE, 2007) et couvre l'ouest et le centre du pays correspondant aux régions administratives de Diourbel, Thiès, Kaolack, Fatick, Kaffrine, Louga (partie sud-est : département de Louga et de Kébémér), une partie de la région de Tambacounda (départements de Koumpentoum et une partie du département de Tambacounda) (Figure 1).



Figure 1. Localisation du Bassin Arachidier (couleur jaune) (source : auteur)

Le BA représente près de 60% de la population rurale du pays. 57% des terres arables du pays se trouve dans le BA qui fournit l'essentiel de la production agricole nationale. Près de 2/3 de la production de mil et d'arachide provient de cette zone de culture sous pluie (CSE, 2007).

La zone est généralement subdivisée en deux zones suivant le gradient pluviométrique (Sall, 2015 ; Faye *et al.*, 2019) :

Le Bassin Arachidier nord (département de Louga, département de Kébémér, région de Thiès et région de Diourbel) est caractérisé par une pluviométrie de juin à octobre entre 400 et 600 mm. L'agriculture y est de type pluvial avec une prédominance de l'arachide et du mil ainsi qu'une faible intégration avec l'élevage ou la foresterie.

Le Bassin Arachidier sud (région de Kaolack, région de Kaffrine, région de Fatick, département de Koumpentoum, une partie du département de Tambacounda) est lui marqué par une pluviométrie entre 600-800 mm. Il présente une hétérogénéité des systèmes de production et constitue l'une des premières zones agricoles du pays. Il y a une forte intégration agriculture- élevage, avec un élevage transhumant ou sédentaire. L'arachide et le mil sont de loin les cultures les plus pratiquées suivies du maïs et du sorgho. Le coton, le niébé et encore le maïs sont des cultures de rente, principales sources de revenus des populations rurales.

Selon le micro-relief, deux types de sols peuvent être distingués dans le BA :

1) les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés, appelés par les agriculteurs sols *dior*, plus répandus, contiennent plus de 95% de sable et une faible teneur en argile et en matière organique ;

2) les sols ferrugineux tropicaux lessivés appelés sols *dek*, avec 85-90% de sable et une teneur en matière organique supérieure à celle des sols *dior* mais inférieure à 1%. Ces derniers, situés dans les dépressions, contiennent plus d'argile (3 à 8%) (Badiane-Ndour *et al.*, 2020 ; Badiane *et al.*, 2000a).

Disparition progressive de la jachère et début de la baisse de la fertilité des sols dans le bassin arachidier

Le système agraire est l'expression spatiale de l'association des productions et des techniques mises en œuvre par une société en vue de satisfaire ses besoins (Vissac et Hentgen, 1980). L'évolution du système agraire dans le Bassin Arachidier est caractérisée par trois périodes (figure 2).

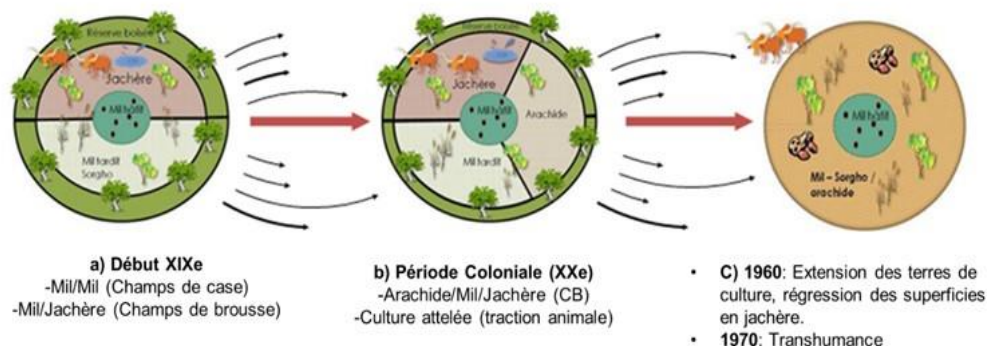


Figure 2. Evolution historique du système agraire dans le Bassin arachidier (source : Masse *et al.*, 2018)

Période précoloniale (18-19^{ème} siècle) : système agropastoral traditionnel

Ce système était caractérisé par trois grandes zones. Autour des habitations, la culture continue du mil précoce ou hâtif domine dans les champs de case (premier auréole ou aire centrale) où la fertilité est entretenue par l'épandage des déjections domestiques et le parcage des troupeaux bovins en fin de saison sèche. L'auréole périphérique (les champs de brousse) se divise en deux parties relativement égales en surface, une caractérisée par une vaste sole rassemblant des grands champs de mil à cycle long, et l'autre par la jachère enclose pâturée et fumée pendant l'hivernage (figura 2a). Cette rotation biennale mil/jachère domine sur cet espace, même si de petites parcelles encloses de manioc et de coton y sont cultivées. La jachère occupe une place importante dans les relations agriculture-élevage, car elle sert non seulement de pâturage aux animaux (enclos) pendant l'hivernage, mais procure aussi de la matière organique au sol à travers les déjections des animaux. Plus loin nous avons la réserve boisée (dernière auréole) représentant l'espace pastoral qui sert de parcours aux troupeaux tant en hivernage qu'en saison sèche. Elle est aussi le lieu de cueillette du bois et toute autre ressource utile (pharmacopée, feuilles et fruits d'arbres pour l'alimentation humaine, etc.). Les zones de bas-fonds inondables sont exploitées en petites rizières encloses, activité féminine par excellence (Garin *et al.*, 1990). Dans un premier temps, ce sont les sols *dior* qui ont été cultivés, c'est également sur ces sols que l'on retrouve les zones de jachère. Les vieux villages sont en général implantés au cœur de ces sols sableux. Les sols *dek* quant à eux s'associent à la réserve forestière pastorale (Lericollais et Millville, 1993). De la même manière les marigots s'intègrent à cet espace utile aux troupeaux, en fournissant des ressources suffisantes en eau. Pendant cette période, les systèmes agricoles étaient donc marqués par une intégration de l'agriculture et de l'élevage (Masse *et al.*, 2018).

Début de la période coloniale (1^{ère} moitié du 20^e siècle) : introduction de la culture d'arachide dans le système agropastoral

Durant cette période, on assiste à l'introduction de la culture d'arachide qui s'intercale ainsi dans la rotation biennale mil/jachère. Le finage garde globalement la même structure. L'auréole de champ de case est cultivée en mil de manière continue. Au niveau de l'auréole périphérique la rotation biennale se transforme en rotation triennale arachide/mil/jachère (figure 2b).

Au niveau des systèmes de culture, le calendrier agricole reste identique pour les champs de case en mil. En revanche le calendrier est plus chargé sur l'auréole périphérique avec l'extension des surfaces cultivées (diminution des réserves forestières).

Les troupeaux sont maintenus sur la jachère en hivernage reliée aux réserves forestières restantes, et parcourent l'ensemble du terroir en saison sèche (vaine pâture). Les techniques de restitutions organiques aux sols sont toujours basées sur la tradition agro-pastorale, et un élevage sédentaire. La sole soumise à la rotation triennale reçoit un apport de fumure tous les trois ans. Les champs de case reçoivent toujours les déchets domestiques quotidiens et un apport de fumure en saison sèche par le parcage nocturne, il est donc soumis à une fumure assez intensive qui permet sa mise en culture continue en mil (Ordu, 2013).

La période coloniale a donc été une période de grands changements (économie, démographique, etc.) mais n'a pas remis en cause les systèmes de production en place, qui se sont perfectionnés. Néanmoins, vers la fin des années 50 les limites du système se font sentir. La contrainte principale étant celle de l'espace disponible : l'augmentation de la production relative à la croissance démographique ne peut plus se faire par extension des surfaces cultivées, sinon au détriment de l'activité pastorale. Une intensification des systèmes de production doit paraître alors nécessaire (Ordu, 2013).

A partir de la 2^{ème} moitié du 20^e siècle

On se situe entre les deux dernières situations (figure 2b et 2c). Au début des années 60, avec la croissance démographique et la généralisation de la culture attelée, on assiste à une extension des surfaces cultivées et par conséquent la disparition progressive de la jachère (Pieri, 1989). Face à la réduction voire la disparition de l'espace pastoral et des jachères au profit des cultures, au début des années 70, le troupeau bovin est contraint à partir en transhumance pendant l'hivernage vers des zones mieux pourvues en pâturage (Lericollais, 1992). La diminution de la présence des animaux conjuguée à une récolte quasi systématique des résidus de culture conduit à une baisse de la fertilité des sols, car les exportations de nutriments ne sont plus compensées par un apport équivalent sous forme de fumure organique (Audouin *et al.*, 2015 ; Badiane *et al.*, 2000b). Dans ce contexte où le terroir est mis en culture dans sa presque totalité, la viabilité du système se pose en termes de renouvellement de la fertilité des sols. Ainsi, l'entretien de la fertilité, ne pouvant plus reposer sur le système de jachère enclose traditionnel, se fait par une combinaison entre fumure organique (mais baisse des quantités à l'hectare avec l'augmentation des surfaces), associations légumineuses-céréales et éventuellement les engrais minéraux. La stratégie dominante en ce qui concerne la fumure semble être une utilisation « extensive » soit une dilution du fumier sur la plus grande surface possible (Toukara, 2021). Par ailleurs, la place que jouaient les légumineuses arborées dans la gestion de la fertilité des sols ne l'est plus à cause de la régression de l'effectif (Lericollais, 1992).

Systèmes de culture, diversité de la gestion de la fertilité des sols et son impact

Le système de culture est un sous-ensemble du système de production. Il est défini pour une parcelle gérée de manière identique par les cultures végétales avec leur ordre de succession (rotation et succession culturale) et les techniques mises en œuvre (Sebillotte, 1990). Il se caractérise, entre autres, par son niveau de production, son rendement et son influence sur la fertilité du sol (Bonnet et Caneill, 1981).

La gestion de la matière organique (MO) est un élément crucial dans la gestion durable des sols contribuant à la durabilité des systèmes de culture dans le Bassin Arachidier (BA). En fonction de la gestion de la MO, deux grands types de systèmes de culture (SC) sont rencontrés dans le BA : le système pratiqué dans les champs de case (CC) et celui pratiqué dans les champs de brousse (CB). Les caractéristiques de ces deux systèmes sont décrites dans ce qui suit :

Les champs de case représentent moins de tiers des parcelles agricoles du BA (Ricome *et al.*, 2017). Ils se caractérisent d'une part, par la monoculture continue de mil et, d'autre part, par les amendements organiques réguliers. Les parcelles se situent à proximité des habitations et reçoivent des amendements organiques de manière échelonnée sur toute la saison sèche. Ces amendements se font soit sous forme d'ordures ménagères ou de fumiers de ferme transportés à l'aide de bassines ou de charrettes depuis les concessions jusqu'aux parcelles (figure 3), et/ou sous forme de parcage nocturne des animaux (figure 3) après leur pâturage libre le jour sur l'ensemble des parcelles du terroir. Sall (2015) rapporte que des quantités de fumure organique variant de 1,2 à 3,5 t/ha pour une moyenne de 1.9 t/ha y sont apportées. Fernandes (1999) et Toukara *et al.*, (2020) suggèrent que les doses de fumier apportées sur des surfaces réduites (apports localisés) peuvent atteindre jusqu'à 20 t/ha. En effet, les apports sur une même parcelle ne sont pas souvent uniformes sur toute la surface au cours d'une même année. L'utilisation des légumineuses est aussi une technique pour renforcer la fertilité (Békoye, 2014). Les effets positifs du niébé, une légumineuse fixatrice d'azote, sur la production du mil et du sorgho en association sont rapportés par Hamidou *et al.*, (2018) et Dabo (2002). Actuellement, avec la baisse des ressources fourragères, l'effectif du cheptel a diminué et par conséquent la fumure organique n'est plus suffisante pour amender tous les champs de case. C'est ainsi que certains ont développé une stratégie avec un rythme moyen de l'ordre d'une fumure tous les 2 à 3 ans (Sall, 2015).

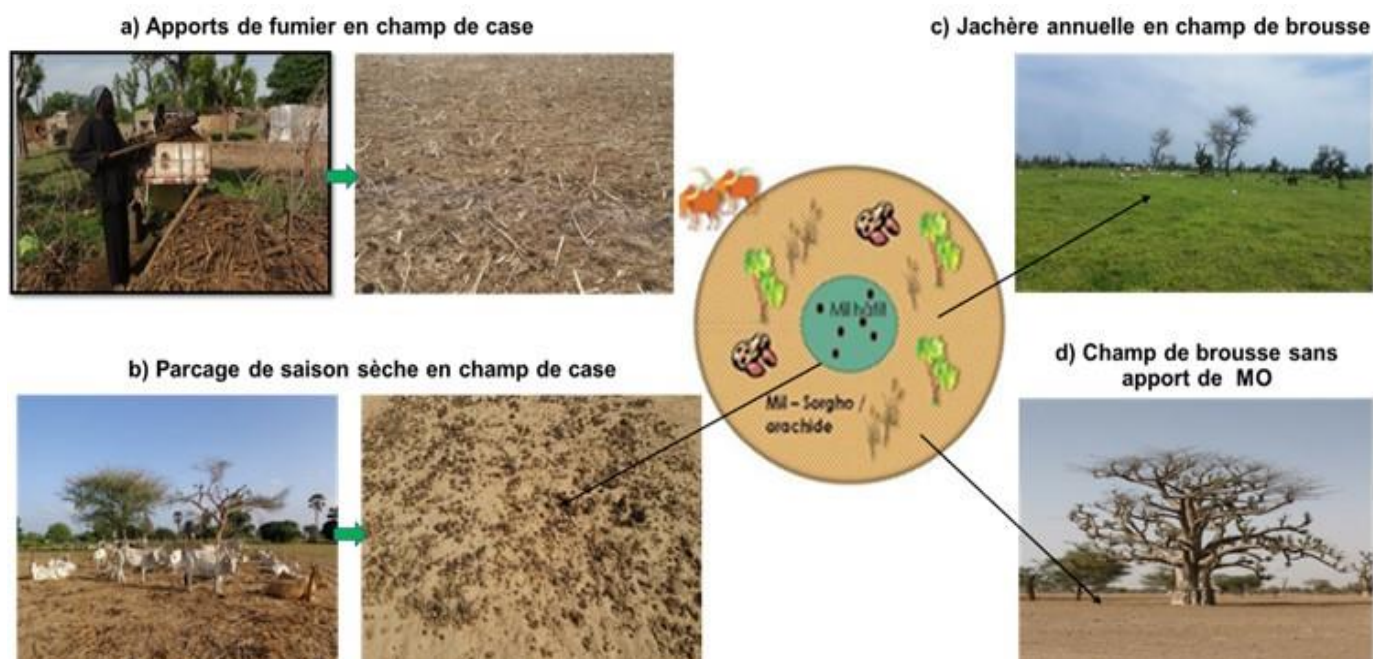


Figure 3. Diversité des modes de gestion actuels de la fertilité dans les systèmes de culture de mil dans le Bassin arachidier (source : auteurs). MO : Matière Organique

Malgré cette diversité de gestion de la fertilité avec des apports plus ou moins réguliers de fumure organique dans les CC, les résultats des travaux de Toukara et al., (2021) indiquent une baisse de la fertilité des sols, en particulier pour le phosphore assimilable et le potassium échangeable durant ces 20 dernières années dans les sols sableux du BA. Ces résultats vont dans le même sens que ceux de Loum et al., (2014) qui indiquent des pertes de stocks de carbone prévisibles, à l'aide du modèle RothC, sur la période 2009-2050 dans le BA. Face à cette situation et dans un contexte de changement climatique, il urge donc de trouver des stratégies permettant une gestion durable de ses systèmes de culture à base de mil et particulièrement en matière de renouvellement de la fertilité des sols.

Les champs de brousse représentent 2/3 des parcelles agricoles (Ricome et al., 2017). Le système se caractérise d'une part, par la rotation biennale arachide/mil et, d'autre part, par la rotation triennale arachide/mil/jachère (figure 3) ou encore par la monoculture de mil (figure 3). La rotation triennale arachide/mil/jachère se pratique dans de rares situations du fait de la quasi-disparition de la jachère (Toukara et al., 2021). La rotation arachide/mil est de plus en plus remplacée par la monoculture du mil ou la rotation niébé/mil surtout dans le nord du BA. Cette situation s'explique entre autres par le manque de semences d'arachide et la cherté des prix et aussi la péjoration climatique. La rotation céréales-légumineuses dans les CB est aussi une forme de diversification et de maintien de la fertilité des sols. Ces légumineuses (arachide, niébé) augmenteraient l'azote minéral du sol de 13 à 40% au profit des céréales en rotation tels que le mil et le sorgho (Hamidou et al., 2018 ; Dabo, 2002). Situés loin des habitations, les CB ne reçoivent pas régulièrement de la matière organique et ceux qui sont plus éloignées n'en reçoivent pas du tout hormis les déjections de la vaine pâture. Blanchard et al., (2014) expliquent cette situation par la distance entre les champs et les lieux de production des fumiers, le faible niveau d'équipement en charrettes et la faible disponibilité des résidus de récolte. En effet, la production de fumier par exploitation agricole dans le BA est faible, estimée entre 0,65 et 6,5 tonnes (Badiane et al., 2000a). Dans les champs de brousse, les arbres fertilitaires sont mis à profit pour renforcer la fertilisation. Les densités de *Faidherbia albida* peuvent être assez importantes sur ces parcelles pour avoir un effet sur le recyclage des ressources et la production du mil associé (Badiane et al., 2000a). Alors que la fumure organique est privilégiée dans les champs de case, les engrais minéraux, faiblement utilisés par les agriculteurs du BA (Masse et al., 2018 ; Diagana et al., 2008), sont préférentiellement apportés sur les champs de brousse et en particulier sur les céréales. La rotation céréales-légumineuses dans les CB est aussi une forme de diversification et de maintien de la fertilité des sols. Ces légumineuses (arachide, niébé) augmenteraient l'azote minéral du sol de 13 à 40% ce qui profite des céréales en rotation tels que le mil et le sorgho (Hamidou et al., 2018 ; Dabo, 2002).

Cette diversité de gestion de la fertilité entre CC et CB a des conséquences sur le stock de carbone des sols et le rendement des cultures (Toukara et al., 2020). Différents travaux menés dans le BA ont montré une variation du niveau de fertilité des sols et des rendements des cultures suivant l'historique de gestion de la fertilité des sols qui distingue, d'une part, les champs de case et, d'autre part, les champs de brousse. Malou et al., (2021) rapportent des stocks de carbone (sur la profondeur 0-30 cm) qui varient entre 2,3 et 59,8 Mg C/ha dans 1 813 parcelles du BA. Selon les auteurs, les stocks moyens étaient significativement plus élevés dans les CC que dans les CB. Ces résultats corroborent avec ceux d'autres auteurs ayant mené des travaux

dans cette région (Affholder, 1995 ; Badiane *et al.*, 2000a ; Badiane *et al.*, 2001). Fofana *et al.*, (2008) et Toukara *et al.*, (2020) rapportent des efficacités d'engrais et le rendement du mil plus élevés en CC qu'en CB.

Un fumier de faible quantité et de moindre qualité utilisé par les agriculteurs

L'essentiel des nutriments apportés aux parcelles agricoles du BA vient du fumier animal produit localement. La qualité et les quantités des fumiers produits à l'échelle des exploitations sont variables, environ 0,75 à 6,5 t an⁻¹ (Badiane *et al.*, 2000a). Les agriculteurs apportent en moyenne, tous les 2-3 ans, des quantités de fumiers de l'ordre de 1,2-3,5 t/ha (Sall, 2015). Une quantité jugée trop faible par rapport à 10 t/ha de fumier recommandée dans ces agrosystèmes (Affholder, 1995). Cette situation a trois causes :

- 1) le manque d'espace pastoral contraignant à faire transhumer le troupeau bovin pendant l'hivernage ;
- 2) le pâturage des animaux qui reviennent sur les parcelles du village au cours de la saison sèche, après une longue période de transhumance pendant la saison culturale. Ces animaux divaguent librement, pendant la journée, dans les parcelles fraîchement récoltées. Les quantités de fumier collectées durant la nuit, où les animaux sont parqués dans les champs de case, ne seraient que la moitié des quantités émises au total dans la journée (Landais et Lhoste, 1993) ;
- 3) le nombre faible d'animaux des exploitations agricoles. On compte 1,3 à 3,6 UBT¹ (Audouin *et al.*, 2015) à l'échelle d'une exploitation agricole dont la superficie cultivée moyenne se situe entre 1 et 5 ha (ANSD, 2014).

Avec la faible disponibilité du fumier, certains agriculteurs ont développé une stratégie de fertilisation qui consiste à faire des apports localisés à des endroits de la parcelle où la production s'est révélée plus faible. Ces apports localisés pouvant atteindre 20 t/ha (Fernandes, 1999 ; Toukara *et al.*, 2020) constituent un moyen d'accroître substantiellement les stocks de carbone des sols.

Avec un ratio C/N (> 16) et des taux de sable élevés (> 31%) (Fernandes, 1999 ; Jarousseau *et al.*, 2016 ; Toukara, 2021), la qualité des fumiers utilisés par les agriculteurs serait médiocre (Toukara, 2021). Selon Ganry et Thuriès (2017), la quasi-totalité des fumiers épandus en zone semi-aride d'Afrique ont des qualités fertilisantes, sanitaires et d'amendements médiocres et cela s'explique par leur composition et leur mode de gestion ou de stockage. Le fumier de la ferme, non composté, est constitué d'un mélange de divers produits (paille ou résidus de céréales, déjections d'animaux, coques d'arachide, fanes d'arachide et de niébé, déchets de cours, cendre de cuisine...). Il est souvent stocké en tas devant les concessions à l'air libre et transporté au champ dès que la quantité est jugée suffisante. L'exposition à l'air et au soleil entraîne des pertes d'azote en particulier et surtout pour la couche superficielle (Hamon, 1972). Quant au fumier issu du parage d'animaux dans les parcelles pendant la saison sèche, il est en général formé d'un mélange de terre et de déjections d'animaux (Toukara, 2021). Le parage s'accompagne d'importantes pertes en éléments nutritifs par l'action des termites et du soleil (Badiane *et al.*, 2000a).

¹ Unité de Bétail Tropical

Hamon (1972) estime qu'une bouse de vache exposée au champ pendant 45 jours est dégradée sous l'effet des termites et perd respectivement 40, 62 et 57% de son contenu initial en azote, phosphore et potassium. La pratique du parage aurait l'avantage de permettre l'apport de l'azote urinaire sur les champs qui serait perdu avec le transfert de bouses de vaches de la ferme vers le champ (Powell et Ikpe, 1992). Dans ce contexte où la production de fumier est limitée et de qualité médiocre, l'amélioration de leur qualité et des quantités pourrait passer par une mobilisation de biomasses non utilisées et la maîtrise des processus de production.

Des pratiques pour améliorer et maintenir la fertilité des sols et augmenter durablement la productivité agricole dans le bassin arachidier

Apport de fumiers compostés

Les fumiers produits par les agriculteurs du BA sont en général des fumiers non compostés, constitués d'un mélange de déjections et de pailles (Affholder, 1995 ; Fernandes, 1999 ; Toukara, 2021). Ces fumiers peuvent être améliorés avec la technique de compostage qui permet d'améliorer la qualité du fumier sans risque pour la plante en vue d'une fertilisation organique plus efficace (Abdou et al., 2016). Outre de fertiliser les plantes avec une libération de façon progressive des nutriments, l'apport de compost aux sols sableux améliore les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de ces derniers (Pale et al., 2021). Il a été montré, au Sénégal, en conditions expérimentales, que la sécheresse, même sévère (pluviométrie comprise entre 200 et 300 mm), analysée sous l'angle de son effet sur la production végétale, est en partie contournée lorsque les sols sont fumés régulièrement par le fumier composté (Ganry et Badiane, 1998).

Combinaison fumure organique x engrais minéraux

Face à des besoins croissants en termes de production agricole et de productivité pour répondre à la demande en aliment d'une population en croissance, les politiques de développement agricole proposent le recours à l'engrais minéral dans les petites exploitations (Masse et al., 2018 ; Garambois et al., 2019). Cependant, les engrais minéraux sont faiblement utilisés par les agriculteurs du BA et cela pour diverses raisons (Audouin et al., 2015 ; Masse et al., 2018). L'intérêt d'associer l'engrais minéral et la matière organique est capitale dans un contexte où les agriculteurs du BA mettent en œuvre depuis longtemps des pratiques d'apports organiques très différenciées en fonction des parcelles (CC et CB). Cela doit inclure des mesures efficaces de fertilisation organo-minérale afin d'éviter des effets néfastes sur le statut organique des sols et sur la production agricole (Badiane et al., 2000b). Dans ces agrosystèmes, l'amélioration et le maintien de la fertilité des sols passerait par la valorisation des fumures organiques utilisées par les agriculteurs à travers le compostage (Abdou et al., 2016), d'une part et, d'autre part, la combinaison entre fumure organique et engrais minéraux (Badiane et al., 2001, Abdou et al., 2016 ; Toukara et al., 2021). Pieri (1992) affirme que la fumure organique combinée à la fertilisation minérale permet d'accroître les rendements et les stabiliser d'une année à l'autre. Toutefois, avec la fumure organique, les processus biologiques de minéralisation ne coïncident pas souvent avec les besoins de la culture. De plus, le bilan minéral n'est pas équilibré à cause des pertes diverses (exportations par la récolte, érosion, rétrogradations plus ou moins irréversibles). Un complément minéral sous forme d'engrais est en général nécessaire pour satisfaire les besoins immédiats de la culture (Berger, 1996). L'effet positif de

l'application conjointe de la fumure minérale et de la fumure organique a été noté sur le maïs (Nyami *et al.*, 2014), le mil (Badiane *et al.*, 2001 ; Coly *et al.*, 2021), le sorgho (Somda *et al.*, 2017). Par ailleurs, Tittonell et Giller (2013) rapportent que l'absence de restitution organique suffisante sur une culture continue de longue durée pourrait dégrader les sols au point de les rendre « non-sensibles » aux engrais minéraux, d'où la combinaison des deux fumures (organique et minérale) pour la protection des sols et l'amélioration de leur productivité.

Rotation et associations culturales céréales-légumineuses

Selon Békoye (2014), la monoculture de céréale en particulier de mil réduit la fertilité et entraîne une dégradation rapide de la structure du sol, favorise une prolifération des maladies (mildiou, charbon), des insectes (foreurs des tiges, piqueurs suceurs de grains) et des adventices comme le Striga (*Striga hermontica*). Le recours à des pratiques de diversification culturales et de rotation des cultures pourrait être une solution pour lever ces contraintes. Selon les caractéristiques des plantes et leurs complémentarités pour la mobilisation des nutriments et de l'eau, leur développement dans l'espace et leur capacité à interagir, divers modes d'associations culturales sont rencontrés dans les zones semi-aride d'Afrique de l'Ouest. Les associations culturales avec le mil peuvent être rencontrées : mil-niébé, mil-sorgho, mil-sorgho-niébé, mil-arachide. Ces associations culturales de même que la rotation des cultures présentent divers avantages. Par exemple, les légumineuses tropicales comme le niébé (*Vigna unguiculata*) et l'arachide (*Arachis hypogaea*) peuvent fixer respectivement jusqu'à 89 et 92% de leurs besoins en azote dans l'atmosphère (Peoples *et al.*, 1995). Hamidou et al. (2018) ont rapporté, dans un système de rotation arachide mil, un enrichissement du sol particulièrement en azote et phosphore par l'arachide au profit du mil dont la production a augmenté de 20%. Bado (2002) rapporte des gains d'azote minéral du sol de 13 à 40% et de 20 à 25% avec comme précédents arachide et niébé respectivement, comparés à la monoculture de sorgho. Ce dernier prélevait 2 à 3 fois plus d'azote, 2 fois plus de P et ses rendements augmentaient de 60 à 300 % après un précédent arachide et niébé respectivement. Ainsi selon le même auteur, les rotations comportant des légumineuses augmentent non seulement l'azote disponible, mais améliorent l'utilisation de l'engrais et valorisent mieux les faibles doses d'engrais utilisées par les producteurs.

Agroforesterie

Dans le système agricole du BA, le parc arboré, résultant d'une sélection et de la conservation de certaines espèces d'arbres dans les champs cultivés, joue un rôle capital. L'arbre constitue, avec le mil et le troupeau bovin, le troisième pilier d'un système agroforestier. Les densités de *Faidherbia albida* dans les champs peuvent être assez importantes pour avoir un effet sur le recyclage des ressources et la production du mil associé (Félix *et al.*, 2018) et fournir aussi du fourrage pour les animaux pendant la saison sèche grâce à sa phénologie inverse (il est en feuilles en saison sèche et les perd en saison des pluies) (Masse *et al.*, 2018). L'action sur le sol de *Faidherbia albida* a également bien été démontrée, qui se traduit par un relèvement général des composantes de la fertilité (Lericollais, 1999). Les prévisions des modèles Century et RothC montrent que l'agroforesterie à base de *F. albida* entraînerait une augmentation moyenne de 0,30 Mg C ha⁻¹ an⁻¹ dans le sol d'ici 2050 dans le BA (Loum *et al.*, 2014). La contribution, dans le parc agroforestier, des individus de *Cordyla pinnata* au stockage de carbone du sol est évalué à 8,81 tCO₂/ha par Diatta et al.

(2016). La régénération naturelle assistée (RNA) constitue aussi un potentiel de stockage de carbone des sols dans les systèmes agraires (Badiane-Ndour *et al.*, 2020). Des gains de rendements en mil d'au moins 41% et une augmentation significative de la teneur en carbone du sol ont été rapportés par Camara *et al.* (2017a) sur des parcelles de RNA comparées aux témoins.

Dans l'espace agricole, la présence d'arbres et de la végétation issue de la régénération naturelle contribue à protéger le sol de l'érosion hydrique et éolienne, facilite la remontée d'eau des horizons profonds des sols vers la surface par un phénomène d'ascenseur hydrique (Kizito *et al.*, 2012) et au recyclage des nutriments qui auraient été perdus sans leur présence dans le système. En effet, l'agroforesterie offre une gamme variée de services allant de la conservation de la qualité des sols à la diversification des sources de revenus des populations locales (Diatta *et al.*, 2016 ; Camara *et al.*, 2017b).

Le parcage des animaux

En plus d'être un capital économique pour leurs propriétaires, le troupeau bovin jouait un rôle dans la gestion de la fertilité des sols à travers les dépôts de fèces durant le parcage nocturne dans les CC, mais également pendant leur séjour dans les zones pastorales ou sur les CB après les récoltes (Masse *et al.*, 2018). En effet, Manlay *et al.*, (2004) ont montré que dans un système mixte agriculture-élevage, le bétail contribue à hauteur de 83% des apports en carbone dans le sol. La rétention des urines par le substrat organique réduit les risques de volatilisation de l'azote de l'urine qui sont élevés en sols sableux (Ganry, 1990). Des travaux menés dans les agrosystèmes du BA rapportent des avantages de rendements du mil et de l'efficacité des engrais des parcelles de parcage d'animaux par comparaison à des parcelles recevant du fumier issu des étables (Toukara *et al.*, 2020).

L'amélioration de la jachère de courte durée

Actuellement dans le BA, avec la pression démographique, on assiste à la saturation de l'espace cultivable et à la réduction des zones de parcours pour les animaux. Cela a comme conséquence la réduction de la durée des jachères (Achard *et al.*, 2001 ; Masse *et al.*, 2018) et donc l'impossibilité d'augmenter les transferts de fertilité depuis ces zones de parcours vers les parcelles cultivées (Gerard *et al.*, 2020). Les jachères de courte durée pratiquées par quelques rares agriculteurs du BA (Toukara *et al.*, 2020) ne sont pas suffisantes pour avoir un impact sur la qualité des sols (Masse, 2007 ; Toukara *et al.*, 2020). Il urge donc de trouver des stratégies d'amélioration de ces jachères. Ainsi, l'enfouissement des résidus végétaux (*Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Acacia raddiana*, *Faidherbia albida*) présents dans les jachères et parcours du bétail en saison des pluies contribuerait à améliorer la qualité des sols (Badiane-Ndour *et al.*, 2001). Le renforcement du tapis herbacé de ces jachères avec l'introduction de graminées à haut potentiel de production de biomasse telles que *Andropogon gayanus*, *Pennisetum pedicellatum* (Achard *et al.*, 2001 ; Badiane-Ndour *et al.*, 2001) contribueraient au stockage de carbone des sols (Badiane-Ndour *et al.*, 2020). L'amélioration des jachères par les sursemis de légumineuses fourragères, en particulier le groupe des *Stylosanthes* avec une forte production de matière sèche, pourraient étendre la fonction fourragère de la jachère à la saison sèche, tout en accélérant la restauration des stocks d'azote du sol (Achard *et al.*, 2001).

Le travail du sol

Le travail profond du sol est peu connu dans les systèmes de culture traditionnelle de la zone tropicale sèche d'Afrique de l'Ouest (Nicou et Poulain, 1972), alors qu'il se révèle être, dans ces zones, le moyen le plus efficace pour créer le profil cultural. Les conséquences sur le plan agronomique en sont importantes : meilleur développement racinaire favorisant la croissance végétale et entraînant des augmentations de rendements sensibles des cultures (Vlaar, 1992). Les labours constituent les modalités de travail profond du sol les plus efficaces. Un effet additionnel sur le rendement du mil de 34% par rapport à une parcelle non travaillé est rapporté par Vlaar (1992). Le labour de fin de cycle se révèle comme la meilleure technique de labour dans les zones tropicale : favorise une bonne gestion des résidus de récolte, évite l'action du vent et des feux de brousse sur les éléments fertilisants et améliore la structure du sol (Nicou et Poulain, 1972).

Adoption de techniques antiérosives

La dégradation des terres cultivées en Afrique de l'Ouest se manifeste par une érosion hydrique intense et une baisse de la fertilité des sols. Ils doivent donc être régénérés pour y maintenir durablement une activité socio-économique (Albergel *et al.*, 2000). On conserve le sol par la mise en place des mesures antiérosives et l'application d'un certain nombre de techniques culturales, qui le protègent contre l'érosion hydrique et éolienne. L'effet positif des techniques de conservation du sol et de l'eau (billonnage, cordons pierreux, dépôt de tiges dans les champs) sur la capacité de rétention d'eau du sol, la restauration de la fertilité et les rendements du mil et du sorgho est rapporté par Sissoko et Lebailly (2019).

Conclusion

Cette revue bibliographique a fait l'état des lieux de l'évolution du mode de gestion de la fertilité des sols des parcelles agricoles du Bassin Arachidier (BA). Nous assistons à l'abandon progressif ou quasi-total des pratiques traditionnelles de renouvellement de la fertilité des sols sous l'effet conjugué de la croissance démographique et du développement de la culture attelée. Cela a eu comme conséquence la baisse de la fertilité des sols et du niveau des rendements des cultures. Aujourd'hui, l'entretien de la fertilité, ne pouvant plus reposer sur le système traditionnel, se fait par une combinaison entre fumure organique (qualité médiocre et de faible dose), associations légumineuses-céréales et éventuellement les engrais minéraux. Malgré ses stratégies développées par les agriculteurs, les sols restent pauvres. Pour renverser la tendance, des technologies adaptées aux agrosystèmes du BA ont été recommandées. Il s'agit de : l'apport de fumier bien décomposé tel que le compost, la combinaison fumure organique et engrais chimique, la rotation et l'association culturale céréales-légumineuses, la pratique de l'agroforesterie, du parage des animaux, l'amélioration de la jachère de courte durée et les techniques antiérosives. Cependant, divers facteurs pourraient limiter l'adoption de ces technologies par les agriculteurs du BA : faible revenu des agriculteurs, méconnaissance des technologies ; absence d'une politique nationale pour l'appui à la gestion de la fertilité ; faible liaison entre Recherche-Vulgarisation-Paysans ; absence de mesures incitatives sur le foncier ; difficulté de transport de la matière organique ; faible mécanisation de l'agriculture ; etc. Leur appropriation par les agriculteurs passerait par les mesures suivantes : faciliter l'accès des agriculteurs au crédit, assurer l'information et la formation des paysans sur les technologies, pratiquer une politique incitative de prix pour les intrants et les produits agricoles, veiller à ce que les intrants soit disponibles en quantité suffisante et de qualité et à temps, développer et vulgariser des matériels appropriés peu coûteux, renforcer la capacité des structures nationales directement impliquées dans la production agricole pour faciliter leur travail.

Références

- Abdou G., Ewusi-Mensah N., Nouri M., Tetteh F. M., Safo E. Y. et Abaidoo R. C. (2016). Nutrient release patterns of compost and its implication on crop yield under Sahelian conditions of Niger. *Nutr Cycl Agroecosyst* 105. p.117–128.
- Achard F., Hiernaux P. et Banoïn M. (2001). Les jachères fourragères naturelles et améliorées en Afrique de l'Ouest ». In Floret C. et Pontanier R. (éd.) : La jachère en Afrique tropicale : rôles, aménagement, alternatives : 2. De la jachère naturelle à la jachère améliorée : le point des connaissances. Paris, Montrouge, IRD, J. Libbey . p. 201-239.
- Affholder F. (1995). Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *F. Crop. Res.* 41. p. 109–121. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)00115-S](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)00115-S).
- Affholder F., Poeydebat C., Corbeels M., Scopel E. et Tittone P. (2013). The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *F. Crop. Res.* 143. p. 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.10.021>.
- Albergel J., Diatta M. et Pépin Y. (2000). Aménagement hydraulique et bocage dans le bassin arachidier du Sénégal. In : La jachère en Afrique tropicale - Ch. Floret, R. Pontanier John Libbey Eurotext, Paris. p. 741-750.
- ANSD. (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE 2013). Rapport définitif. 417pages.
- Audouin E., Vayssière J., Ordu., O., Masse D., Dorégo S., Delaunay V. et Lecomte P. (2015). Réintroduire l'élevage pour accroître la durabilité des terroirs villageois d'Afrique de l'Ouest. Le cas du bassin arachidier au Sénégal. *Escape-P4 Chapitre 1*. p. 403–427.
- Badiane A. N. (1993). Le statut organique d'un sol sableux de la zone Centre-Nord du Sénégal. Thèse de doctorat de l'Université de Lorraine – INPL - ENSAIA. 200pages.
- Badiane A. N., Khouma M. et Séné M. (2000a). Région de Diourbel : Gestion des sols. *Drylands Research Working Paper*. 25 pages.
- Badiane A. N., Khouma M. et Séné M. (2000b). Gestion et transformation de la matière organique. Synthèse des travaux de recherches menées au Sénégal depuis 1945. Dakar, ISRA.131 pages.
- Badiane A., Faye A., Yamoah C.F. et Dick R.P. (2001). Use of Compost and Mineral Fertilizers for Millet Production by Farmers in the Semiarid Region of Senegal. *Biol. Agric. Hortic.* 19. p. 219–230. <https://doi.org/10.1080/01448765.2001.9754926>.
- Badiane-Ndour Y. B., Chotte J-L., Pate E., Masse D. et Rouland C. (2001). Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semiarid tropical regions. *Applied Soil Ecology*, 18 (3). p. 229-238.

Badiane-Ndour Y.B., Loum M., Diouf A., Wélé A., Ndiaye O., Masse D. et Lardy C.L. (2020). Dynamique de stockage du carbone dans les sols du Sénégal. Acquis de la recherche et perspectives. In Chevallier, T., Razafimbelo, T M., Lardy, L C., Brossard, M., 2020. Carbone des sols en Afrique : Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. Nouvelle édition. Rome, Marseille : IRD Éditions, 2020. p. 157-171.

Berger M. (1996). Fumure organique : des techniques améliorées pour une agriculture durable. Agriculture et développement 10. p. 37-46.

Békoy B.M. (2014). Diagnostic des systèmes de culture à base de mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] en Côte d'Ivoire et perspectives d'amélioration. Appl. Biosci. 79. p. 6878-6886.

Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P. et 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 ? Biotechnol. Agron. Soc. Environ 18(4). p. 512-523.

Bonnefond P. et Caneill J. (1981). Système de culture irriguée et unité de production paysannes sur la rive gauche du fleuve Sénégal. ORSTOM-INAPG. In ROCA, P.J. Différentes approches des systèmes agraires.

Camara B. A., Dramé M., Sanogo D., Ngom D., Badji M., Diop M. (2017a). La régénération naturelle assistée : perceptions paysannes et effets agro-écologiques sur le rendement du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) dans le bassin arachidier au Sénégal. *Journal of Applied Biosciences* 112. p. 11025-11034. <https://dx.doi.org/10.4314/jab.v112i1.7>

Camara B., Sagna B., Ngom D., Niokane M., Gomis Z.D. (2017b). Importance socioéconomique de *Elaeis guineensis* Jacq. (Palmier à huile) en Basse-Casamance (SENEGAL) *European Scientific Journal*, 13 (12) ISSN. p. 1857 – 7881 .doi:10.19044/esj.2017.v13n12p214
URL:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2017.v13n12p214>

CEDEAO, UEMOA, CILSS (2016). Catalogue Régional des Espèces et Variétés Végétales. 109 pages.

Coly I., Badiane A., Ndiaye Y.N., Ba D. et Goudiaby A.O.K. (2021). Influence of organo-mineral fertilization rate on organic performance of sanio millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. BR.) In Lower Casamance (Southern SENEGAL). *International Journal of Agriculture, Environment and Bioresearch*. p. 192-208.

CSE, 2007. Caractérisation des systèmes de production agricoles au Sénégal. Document de synthèse. 38p.

Dabo B. V. (2002). Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina faso. Thèse de doctorat de l'Université Laval Québec. Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation. Département des sols et de génie agroalimentaire. 183 pages.

Diagana B., Mankor A., Fall C. S. et Guèye A. (2008). Agriculture durable et réduction de la pauvreté dans le Bassin arachidier du Sénégal: Résultats du Modèle Analyse Tradeoffs. ISRA - Reflexions et perspectives 6 (5). 44 pages.

Diatta A. A., Ndour N., Manga A., Sambou B., Faye C. S., Diatta L., Goudiaby A., Mbow C. et Dieng S. D. (2016). Services écosystémiques du parc agroforestier à *Cordyla pinnata* (Lepr. ex A. Rich.) Milne-Redh. dans le Sud du Bassin Arachidier (Sénégal). Int. J. Biol. Chem. Sci. 10 (6). p. 2511-2525. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.9>

Diouf M. (1990). Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostic en parcelles paysannes. Thèse de doctorat INA-PG, Paris. 227 pages.

Faye-Mané N. F. (2017). Les déterminants et l'impact de l'adoption des semences certifiées de mil et de sorgho dans le bassin arachidier du Sénégal. Thèse de doctorat de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Faculté des Sciences Économiques et de Gestion. 197 pages.

Faye N. F., Sall M., Affholder F. et Gerard F. (2019). Inégalités de revenu en milieu rural dans le bassin arachidier du Sénégal. Papiers de Recherche AFD, n° 115, Octobre. 54 pages.

Fernandes P. (1999). Effets des modes de gestion des terres en zone sahélienne Sur les termes et l'évolution de leur bilan organique et Biologique : Conséquences pour une production céréalière Soutenue-Cas du Sénégal. Sc. Agronomique. Université de Lorraine. INPL-ENSAIA. 200 pages.

Félix G. F., Scholberg J. M.S., Clermont-Dauphin C., Cournac L. et Tittone P. (2018). Enhancing Agroecosystem Productivity with Woody Perennials in Semi-Arid West Africa. A Meta-Analysis. *Agronomy for Sustainable Development* 38 (6). p. 38-57. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0533-3>.

Ganry F. (1990). Application de la méthode isotopique à l'étude des bilans azotés en zone tropicale sèche. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, 355 pages.

Gary F., Badiane A. (1998). et La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne : Diagnostic et perspectives. *Agriculture et développement*, 18. p. 73-80.

Ganry F. & Thuriès L. (2017). Chapitre 13- Intérêt des fumiers pour restaurer la fertilité des sols en zone semi-aride d'Afrique. In : *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens. Contribution à l'agroécologie*. Editions IRD. p. 179-195.

Garambois N., Le Goff U. et Thibaudeau L. (2019). Chapitre 1 - Sécheresse et ajustement structurel, une double adaptation : bassin arachidier sénégalais. In *Systèmes agraires et changement climatique au sud*, Edition Quae, 2019.

Garin L., Faye A., Lericollais A. et Sossokho M. (1990). Evolution du rôle du bétail dans la gestion de la fertilité des terroirs sereer du Sénégal. *Les cahiers de la Recherche Développement* N°26, juin 1990. p. 65-84.

- Gerard F., Affholder F., Mane N. F. et Sall M. (2020). Impact de différentes politiques publiques sur l'intensification agroécologique et les inégalités de revenu dans le Bassin arachidier du Sénégal. *Papier de recherche*, AFD Septembre 2020 N°149. 76 pages.
- Hamidou F., Harou A., Achirou B. F., Halilou O. et Bakasso Y. (2018). Fixation de l'azote chez l'arachide et le niébé en condition de sécheresse pour l'amélioration de la productivité au Sénégal. *Tropicultura*, 36 (1). p. 63-79.
- Hamon R. (1972). L'habitat des animaux et la production d'un fumier de qualité en zone tropicale sèche (bilan de trois années d'études). *Agronomie Tropicale* 27(5). p. 592-607.
- Jarousseau, H., Houot, S., Paillat, J.M., Saint-Macary, H., 2016. Le recyclage des résidus organiques. Edition Quæ, 276p.
- Kizito F., Drazila M. I., Séne M., Brooks J. R., Meinzer F. C., Diedhiou I., Diouf M., Lufafa A., Dick R. P., Selker J. et Cuenca R. (2012). Hydraulic redistribution by two semi-arid shrub species: implications for Sahelian agroecosystems. *Journal of Arid Environments*, 83. p. 69-77.
- Landais E. & Lhoste P. (1993). Systèmes d'élevage et transferts de fertilité dans les zones des savanes africaines. *Cahiers Agricultures*, 2. p. 9-25.
- Lericollais A. (1992). Gestion de l'environnement rural en pays sereer. Fonds documentaire ORSTOM. p. 149-163.
- Lericollais A. & Milleville P. (1993). La jachère dans les systèmes agro-pastoraux sereer au Sénégal. Floret C. (ed.), Serpantié Georges (ed.). *La jachère en Afrique de l'Ouest*. Paris : ORSTOM. (Colloques et Séminaires). ISBN 2-7099-1144-2. p. 133-145.
- Loum M., Viaud V., Fouad Y., Nicolas H. et Walter C. (2014). Retrospective and prospective dynamics of soil carbon sequestration in Sahelian agrosystems in Senegal. *Journal of Arid Environments*. 100-101. p. 100-105.
- Malou P. O., Moulin P., Chevallier T., Masse D., Vayssières J., Badiane-Ndour N. Y., Tall L. et Chapuis-Lardy L. (2021). Estimates of carbon stocks in sandy soils cultivated under local management practices in Senegal's groundnut basin. *Regional Environmental Change*. p. 21:65. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01790-2>
- Manlay R. J., Ickowicz A., Masse D., Feller C. et Richard D. (2004). Spatial carbon, nitrogen and phosphorus budget in a village of the West African savanna-II. Element flows and functioning of a mixedfarming system. *Agricultural Systems*, 79 (1). p. 83-107.
- Masse D. (2007). Changements d'usage des terres dans les agrosystèmes d'Afrique sub-saharienne : propriétés des sols et dynamique des matières organiques. HDR, Institut national polytechnique de Toulouse, INPT. 82pages.
- Masse D., Lalou R., Tine C., Ba M. et Vayssières J. (2018). Les trajectoires agricoles dans le bassin arachidier au Sénégal : éléments de réflexion à partir de l'observatoire de Niakhar. In: Delaunay V, Desclaux A and Sokhna C (eds) Niakhar, mémoires et perspectives. *Recherches pluridisciplinaires sur le changement en Afrique*. Éditions de

l'IRD & L'Harmattan Sénégal, Marseille & Dakar. p. 311–332. https://horizon.documentation.ird.fr/exl doc/pleins_textes/divers18-11/010074565.pdf.

Mémento de l'Agronome (1991). Collections « Techniques rurales en Afrique ». Quatrième édition. Ed. Millistère de la Coopération française. 1635 pages.

Nicou R. & Poulin J. F. (1972). Les effets agronomiques du travail du sol en zone tropicale sèche. *Machinisme Agricole Tropical*. 37. p. 35-41.

Nyami B. L., Sudi C. K. et Lejoly J. (2014). Effet du biochar et des feuilles de *Tithonia diversifolia* combiné à l'engrais minéral sur la culture du maïs (*Zea mays* L.) et les propriétés d'un sol ferrallitique à Kinshasa (RDC). *BASE*, 20 (1). p. 57-67.

Ordu M. (2013). Flux de biomasse et renouvellement de la fertilité des sols à l'échelle du terroir. Etude de cas d'un terroir villageois sereer au Sénégal. Mémoire de fin d'étude. Ecole Supérieure d'Agro-Développement International. 109 pages.

Pale S., Barro A., Koumbem M., Sere A. et Traore H. (2021). Effets du travail du sol et de la fertilisation organo-minérale sur les rendements du mil en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 15 (2). p. 497-510.

Peoples M. P., Herridge D. F. et Ladha J.K. (1995). Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production ? *Plant and Soil* 174. p. 3-28.

Pieri C. (1989). Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris, ministère de la Coopération et du Développement, Cirad-Irat, La Documentation française. 444 pages.

Powell M. & Ikpe F. (1992). Fertilizer factories. *ILEIA Newsletter*, 8. p. 13-14.

Ricome A., Affholder F., Gérard F., Muller B., Poeydebat C., Quirion P. et Sall M. (2017). Are subsidies to weather-index insurance the best use of public funds? A bioeconomic farm model applied to the Senegalese groundnut basin. *Agric. Syst.* 156. 149-176.

Sall M. (2015). Les exploitations agricoles familiales face aux risques agricoles et climatiques : stratégies développées et assurances agricoles. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse le Mirail – Toulouse II. 277 pages.

Sebillote M. (1990). Deuxième partie. Conséquences pour les démarches d'aide à la décision. In Brossier J., Vissac B., Le Moigne J.L. (eds) *Modélisation Systémique et Système agricole*. INRA. Paris. 106-117.

Sissoko P. & Labailly P. (2019). Les déterminants des rendements du mil et du sorgho avec la technique du microdosage d'engrais. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 7 (2). p. 213-222.

Sileshi G. W. (2016). The magnitude and spatial extent of influence of *Faidherbia albida* trees on soil properties and primary productivity in drylands. *Journal of Arid Environments*. 132. p. 1-14.

Somda B. B., Ouattara A. B., Serme I., Pouya M. B., Lompo F., Taonda S. J. P. et Sedogo P. M. (2017). Détermination des doses optimales de fumures organo-minérales en microdose dans la zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11(2). p. 670-683. <http://ajol.info/index.php/ijbcs>

Tittonell P. & Giller K.E. (2013). When yield gaps are poverty traps: The paradigm of ecological intensification in African smallholder agriculture. *F. Crop. Res.* 143. p. 76-90.

Toukara A., Clermont-Dauphin C., Affholder F., Ndiaye S., Masse D. et Cournac L. (2020) Inorganic fertilizer use efficiency of millet crop increased with organic fertilizer application in rainfed agriculture on smallholdings in central Senegal. *Agric Ecosyst Environ* 294:106878. p. 2-11. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106878>

Toukara A. (2021). Efficacité d'utilisation des nutriments par la culture de mil dans le bassin arachidier du Sénégal : Effet des pratiques de gestion organique et des rotations culturales. Thèse de doctorat unique de l'Université Iba Der Thiam de Thies. Mention : Agronomie. Spécialité : Agronomie et Gestion des Systèmes Agrosylvopastoraux. 170 pages.

Vissac B. et Hentgen A. (1980). Eléments pour une problématique de recherche sur les systèmes agraires et le développement. INRA (S.A.D.), Paris. In ROCA, P.J. Différentes approches des systèmes agraires.

Vlaar J. C. J. (1992). Les techniques de conservation des eaux et des sols dans les pays du Sahel. Rapport d'une étude effectuée dans le cadre de la collaboration entre le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (C1EH), Ouagadougou Burkina Faso, et l'Université Agronomique Wageningen (UAW), Wageningen, les Pays-Bas. 99 pages.