

Potentiel d'amélioration de la durabilité des systèmes de production agricole du bassin arachidier sénégalais par le semis arasous couvert végétal de *Stylosanthes hamata* (L.) Taub.



Abib CAMARA

COMMUNAUTÉ FRANÇAISE DE BELGIQUE
UNIVERSITÉ DE LIÈGE – GEMBLoux AGRO-BIO TECH

**POTENTIEL D'AMÉLIORATION DE LA DURABILITÉ DES SYSTÈMES DE
PRODUCTION AGRICOLE DU BASSIN ARACHIDIER SÉNÉGALAIS PAR LE SEMIS
SOUS COUVERT VEGETAL DE *STYLOSANTHES HAMATA* (L.) TAUB.**

Abib CAMARA

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques
et ingénierie biologique

Promoteurs

Professeur Jérôme BINDELLE (ULiège, Belgique)

Professeur Abdoulaye DIENG (ENSA / UIDT, Sénégal)

Année civile : 2022

Résumé

L'agriculture familiale, principale mode de mise en valeur des terres agricoles au Sénégal, se caractérise par des baisses de rendements, des pertes de revenus des ménages ruraux et la dégradation des conditions de production. Pour améliorer leurs performances, leur durabilité et leur résilience face aux risques climatiques, les systèmes de culture sous couvert végétal sont proposés dans d'autres contextes tropicaux. Des études ont dès lors été menées pour répondre aux questions de recherche suivantes : (1) quels sont les intérêts potentiels des systèmes de culture en semis sous couvert végétal et (2) comment les mettre en œuvre dans le Bassin arachidier sénégalais à partir de la fabacée *Stylosanthes hamata* ? Pour ce faire une démarche de co-conception combinée à l'expérimentation en station a été appliquée. Elle est fondée sur des enquêtes auprès de 65 exploitations agricoles familiales (EAF), affiliées à une organisation de producteurs de *Jatropha*, qui ont été réalisées afin de les classer sur la base de leur capacité de production, de comprendre leur fonctionnement et d'identifier les innovations agricoles potentiellement prometteuses. Les expérimentations ont été conduites sur trois ans. L'essai en station comprenait huit traitements en blocs randomisés avec quatre répétitions : cinq traitements en semis sous couvert végétal (SCV) de *S. hamata* et trois traitements basés sur les systèmes de culture traditionnels. Les parcelles des traitements en SCV ont été subdivisées, à partir de la deuxième année, pour appliquer deux niveaux (avec ou sans) de fumure organique et deux modalités de gestion de la biomasse de *Stylosanthes* (recépage ou non recépage). Une partie de ce dispositif, quatre traitements, a été répliquée dans six villages du département de Foundiougne.

La typologie des EAF, en quatre classes, est basée principalement sur leur niveau d'équipement agricole et la disponibilité en ressources (terre, animales). Les EAF de type I (6,1%) se caractérisent par une importante disponibilité foncière (27,5 ha), une diversité d'équipements agricoles à traction animale et un cheptel important et diversifié. Le type I se distingue du type IV (10,8 %) principalement par la taille du cheptel et la diversité d'espèces animales. Les EAF de type II (30,8%) qui disposent de 5,3 ha en moyenne, sans aucun animal de trait ni de matériel agricole de traction animale, sont en situation de précarité aiguë menaçant même leur survie. Le type III (52,3%) dispose en moyenne de 9,4 ha et d'un cheptel composé d'ânes et de petits ruminants. Deux grands types de systèmes de culture basés sur la rotation arachide/mil et la monoculture du mil avec un faible apport de fumure organique ont été identifiés. La pratique généralisée d'un élevage extensif ne favorise pas les productions animales, d'une part, et compromet le développement de synergies entre l'élevage et les cultures au sein des exploitations, d'autre part.

Les essais de mise au point de systèmes de culture en SCV de *S. hamata*, en comparaison aux systèmes traditionnels, ont montré des performances de production plus faibles des systèmes en SCV. En station, les rendements moyens annuels de mil grain s'établissaient entre 29 et 250 kg.ha⁻¹ en SCV contre 200 et 865 kg.ha⁻¹ pour les des systèmes traditionnels. Les rendements moyens de mil obtenus en milieu paysan étaient de 177 kg.ha⁻¹ en SCV contre 487 kg.ha⁻¹ pour le système traditionnel de culture du mil. S'agissant de l'arachide, les rendements en gousses obtenus en SCV s'établissaient entre 378 à 867 kg.ha⁻¹, en station, et à 276 kg.ha⁻¹, en milieu paysan, contre 641 et 1708 kg.ha⁻¹ pour les systèmes traditionnels. Ces performances de production plus faible des systèmes en SCV sont associées à la concurrence de *S. hamata* vis-à-vis de la culture principale. Cependant, cette perte de rendement est moins marquée en milieu paysan du fait des conditions hydriques plus favorables et de la durée de cycle plus longue des variétés paysannes : ce qui renforce les effets positifs des mesures de mitigation. En effet, l'application de fumure organique combinée à une bonne alimentation hydrique semble être efficace pour juguler les effets dépressifs de *S. hamata* sur le rendement du mil. Ces effets sont cumulatifs avec ceux du recépage de la biomasse de *S. hamata* et du sarclage dans la ligne de semis qui ont été observés, en station et en milieu paysan. Le recépage de *S. hamata* présente, en outre, l'intérêt d'augmenter la production totale de biomasse et sa qualité nutritive aux fins d'alimentation animale. Toutefois, l'efficacité du recépage sur la gestion de l'enherbement des cultures est limitée : il réduit la diversité des espèces adventices sans affecter leur niveau d'infestation global. Le suivi, en station, de la fertilité chimique du sol a montré que celle-ci est affectée de manière significative par l'assolement, l'application de fumure organique et la combinaison de ces facteurs. Les principaux paramètres de fertilité du sol, notamment la teneur en matière organique, ont été améliorés. Exceptionnellement, des baisses de la teneur en azote du sol ont été observées,

principalement avec la restitution des tiges mil et sans apport de fumure organique. Les systèmes de culture en SCV *S. hamata*, combiné à la fumure organique, permettent les meilleurs équilibres de nutriments du sol.

Nous concluons que les systèmes en SCV pourraient constituer une voie pour améliorer le fonctionnement des EAF et renforcer les synergies entre les productions animale et végétale, à travers l'augmentation de la disponibilité fourragère et de la fumure organique au sein de l'exploitation et une meilleure gestion de la fertilité des sols, à conditions de dissiper les effets de la concurrence de *S. hamata* sur le rendement.

Mots clés: Système de culture, durabilité, semis direct, *Stylosanthes hamata*, élevage.

Abstract

Small farming, the main agricultural system in Senegal, is characterized by lower yields, loss of income for rural households and the deterioration of production conditions. To improve performance, sustainability and resilience to climate risks, cropping systems under plant cover are proposed in other tropical contexts. Studies have therefore been carried out to answer the following research questions : (1) what are the potential interests of direct seeding cropping systems (DSS) under cover crop and (2) how to implement them in the Senegalese Groundnut Basin under the fabacea *Stylosanthes hamata* ? To do this, a co-design approach combined with station experimentation was applied. It is based on surveys of 65 family farms, affiliated to an organization of *Jatropha* producers, which were carried out in order to classify them on the basis of their production capacity, to understand their functioning and to identify the potentially promising agricultural innovations. The experiments were carried out over three years. The on-station trial comprised eight randomized block treatments with four replicates : five DSS treatments under *S. hamata* cover crop and three treatments based on traditional cropping systems. The DSS treatments plots were subdivided, from the second year, to apply two levels (with or without) organic manure and two management practices of the biomass of *Stylosanthes* (cutting and removal or uncut). Part of this device, four treatments, was replicated in six villages in the department of Foundiougne.

The results of the typology make it possible to classify family farms into four main categories, mainly on the basis of their level of agricultural equipment and the type of livestock farming practiced. Type I Family farms (6.1%) are characterized by significant land availability (27.5 ha), a diversity of animal-drawn agricultural equipment, and a large and diversified livestock. Type I differs from type IV (10.8%) mainly by its larger livestock size. Type II (30.8%), which covers 5.3 ha on average, without any draught animals or animal-drawn agricultural equipment, are in a situation of acute precariousness that even threatens their survival. Type III (52.3%) covers an average of 9.4 ha and livestock made up of donkeys and small ruminants. Two main types of cropping systems based on groundnut/millet rotation and continuous cultivation of millet with little organic manure were identified. The widespread practice of extensive livestock production does not favor production, on the one hand, and compromises the development of synergies between animal and crop production within the farms, on the other hand.

Trials to develop *S. hamata* DSC cropping systems, compared to traditional systems, showed significantly lower production performance of DSC systems. On-station average annual grain millet yields ranged from 29 to 250 kg.ha⁻¹ under DSC compared to 200 to 865 kg.ha⁻¹ under traditional systems. The average millet yields obtained in rural areas were 177 kg.ha⁻¹ under DSC compared to 487 kg.ha⁻¹ for the traditional millet system. With regard to groundnuts, the pod yields obtained under DSC ranged from 378 to 867 kg.ha⁻¹ on station and 276 kg.ha⁻¹ on farm, compared to 641 and 1708 kg.ha⁻¹ for traditional systems. The decrease in production observed is related to the competition of *S. hamata* with the main crop. This loss of production is, however, less important in the farming environment than in the station because of the more favorable hydric conditions and the longer cycle length of the farming varieties, which allows a better expression of the mitigation measures of the competition of *S. hamata*. Indeed, the application of organic manure combined with a good water supply seems to be effective in curbing the depressive effects of *S. hamata* on millet yield.

In addition, positive effects of *S. hamata* biomass pruning and weeding in the seed line were observed, both on station and in the field, on millet and groundnut yield. Re-cultivation of *S. hamata* also has the advantage of increasing total biomass production and nutritional quality for animal feed. However, the effectiveness of pruning in limiting crop weediness is low: it reduces the diversity of weed species without affecting their overall infestation level.

Monitoring of soil chemical fertility from the on-station trial showed that it is significantly affected by rotation, application of organic manure and the combination of factors. The main parameters of soil fertility, in particular the organic matter content, are improved with the studied cropping systems. Exceptionally, decreases in soil nitrogen content were observed, mainly with the return of millet stems and without the application of organic manure. The DSC cropping systems for *S. hamata*, with organic manure input, provide the best soil nutrient balance.

In fact, Provided that the effects of *S. hamata* competition on yield are dissipated, DSC systems could be a way to improve the functioning of family farms and strengthen synergies between animal and crops productions, through increased fodder and organic manure availability within the farm and better soil fertility management.

Keywords : Cropping system, sustainability, direct seeding, *Stylosanthes hamata*, breeding.

In memorial

A mes défunts parents: mon papa, Yaya CAMARA, et mes frères et amis, Sékou Fanta Mady et Bassirou TOURE.

Au Professeur Guy MERGEAI qui nous a donné l'opportunité de faire cette thèse et assuré son encadrement.

Remerciements

Je me dois de témoigner ma reconnaissance et ma gratitude à ma famille, pour les encouragements, les efforts et sacrifices consentis durant toutes ces années.

Il me plaît d'adresser ma profonde gratitude au peuple belge à travers la Commission Universitaire au Développement (CUD) et l'Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur (ARES) qui ont financé cette thèse.

Je témoigne ma reconnaissance et ma gratitude à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture (ENSA - Sénégal) pour l'accompagnement, l'appui logistique et technique à la réalisation des travaux de terrain et des nombreux déplacements en milieu paysan.

Mes remerciements vont à l'endroit des producteurs de la Fédération (FPTF) de Foundiougne qui m'ont donné de leur temps et la matière pour mes travaux. Je magnifie leur collaboration et leur engagement pour l'innovation et la recherche agricole.

A mes maîtres et juges, j'exprime ma profonde gratitude pour l'encadrement, les conseils et l'accompagnement apportés durant toutes ces années.

Table des matières

Résumé.....	ii
Table des matières.....	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xii
Liste des abréviations.....	xiv
Introduction générale.....	- 1 -
Problématique et démarche de recherche.....	- 4 -
Chapitre I.....	- 7 -
Amélioration des systèmes de production mixtes en Afrique soudano-sahélienne. Rôle de l'espèce Stylosanthes hamata (L.) Taub. (synthèse bibliographique).....	- 7 -
Résumé.....	- 8 -
Abstract.....	- 9 -
Introduction.....	- 10 -
I. 1. Caractéristiques des principaux systèmes de production mixtes des régions sahélo-soudaniennes d'Afrique.....	- 10 -
I. 2. Intérêts de l'espèce S. hamata pour améliorer les performances de systèmes de production mixtes.....	- 12 -
2. 1. Intérêts édaphiques de S. hamata.....	- 12 -
2. 2. Intérêts fourrager et nutritionnel pour les animaux.....	- 13 -
I. 3. Voies possibles d'intégration de S. hamata dans les systèmes de production agricole mixtes.....	- 14 -
-	
I. 4. Contraintes au développement des systèmes intégrant S. hamata.....	- 15 -
Conclusion.....	- 16 -
Chapitre II.....	- 17 -
Analyses prospectives des possibilités d'amélioration durable des performances des exploitations agricoles de l'ouest du Bassin Arachidier du Sénégal : cas des producteurs de Jatropha (Jatropha curcas L.).....	- 17 -
Résumé.....	- 18 -
Abstract.....	- 19 -
Introduction.....	- 20 -
II. 1. Matériel et méthode.....	- 20 -
1. 1. Cadre d'étude.....	- 20 -
1. 2. Collecte des données.....	- 21 -
1. 3. Prétraitement et analyse des données.....	- 21 -
II. 2. Résultats.....	- 22 -
2. 1. Typologie des exploitations.....	- 22 -
2. 1. 1. Les facteurs de production.....	- 22 -
2. 1. 2. Classification des exploitations.....	- 23 -
2. 2. Les productions végétales.....	- 27 -
2. 3. Les productions animales.....	- 29 -
II. 3. Discussion.....	- 30 -
3. 1. Typologie des exploitations.....	- 30 -
3. 2. Les systèmes de production.....	- 30 -
3. 3. Perspectives d'évolution.....	- 31 -
Conclusion.....	- 32 -
Chapitre III.....	- 33 -
Co-conception de systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) de Stylosanthes hamata dans le bassin arachidier du Sénégal – Analyse des opportunités, des contraintes et des comportements des agriculteurs.....	- 33 -
Résumé.....	- 35 -

Abstract	- 36 -
Introduction	- 37 -
III. 1. Matériels et méthode	- 37 -
1. 1. La zone et les conditions d'étude	- 37 -
1. 3. Dispositif expérimental	- 40 -
1. 4. Mesure de l'engagement et de la capacité d'initiative des producteurs	- 40 -
1. 5. Collecte et traitement des données	- 41 -
III. 2. Résultats	- 41 -
2. 1. Installation des essais et établissement de <i>S. hamata</i>	- 41 -
2. 2. Productions et rendements des cultures principales	- 41 -
2. 3. Production et qualité fourragère de <i>S. hamata</i>	- 42 -
2. 4. Contraintes de l'expérimentation en milieu paysan	- 45 -
2. 5. Engagement et créativité des producteurs	- 46 -
III. 3. Discussion	- 46 -
Conclusion.....	- 48 -
Chapitre IV	- 49 -
Mise au point de systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) - Performances de production et évolution des propriétés chimiques des sols.....	- 49 -
Résumé.....	- 51 -
Abstract	- 52 -
Introduction	- 53 -
IV. 1. Matériels et méthode	- 53 -
1. 1. Site expérimental.....	- 53 -
1. 2. Traitements et plan d'expérience	- 54 -
1. 3. Collectes de données et analyses des échantillons	- 55 -
1. 4. Analyses statistiques des données	- 55 -
IV. 2. Résultats	- 55 -
2. 1. Productivité et rendements des cultures	- 55 -
2. 1. 1. Production et rendements du mil.....	- 55 -
2. 1. 2. Production et rendements de l'arachide	- 57 -
2. 2. Biomasses et qualité fourragère.....	- 58 -
2. 2. 1. Production de biomasses	- 58 -
2. 2. 2. Qualité nutritive du fourrage de <i>S. hamata</i>	- 61 -
2. 3. Fertilité chimique du sol.....	- 64 -
2. 3. 1. Acidité du sol et teneurs en nutriments	- 64 -
2. 3. 2. Equilibre chimique des nutriments	- 68 -
IV. 3. Discussion	- 71 -
Conclusion.....	- 73 -
Chapitre V	- 74 -
Effect of management practices for <i>Stylosanthes hamata</i> (L.) Taub. biomass cover on the weed species in different direct-seeding, mulch-based cropping systems. <i>Weed Biology and Management</i> (2018): 1-13	- 74 -
Chapitre V	- 74 -
Effets des pratiques de gestion de la biomasse de couverture à <i>Stylosanthes hamata</i> (L.) Taub. sur les espèces d'adventices des systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal. <i>Weed Biology and Management</i> (2018): 1-13	- 74 -
Abstract	- 76 -
Résumé.....	- 77 -
Introduction	- 78 -
V. 1. Materials and methods.....	- 78 -
1. 1. Experimental site.....	- 78 -
1. 2. Treatments and experimental design	- 79 -
1. 3. Data collection and processing	- 79 -

V. 2. Results	- 80 -
2. 1. Ground cover provided by litter and <i>S. hamata</i> vegetation	- 80 -
2. 2. Floristic composition	- 81 -
2. 3. Diversity of weed species	- 86 -
2. 4. Contribution to biovolume and weed biomass	- 86 -
2. 5. Phytosociology of the weed species	- 88 -
2. 6. Crop production and yield	- 89 -
V. 3. Discussion	- 91 -
Conclusion.....	- 92 -
Chapitre VI.....	- 94 -
Discussion générale.....	- 94 -
VI. 1. Critique de la méthodologie adoptée.....	- 95 -
VI. 2. Performance de production	- 95 -
VI. 3. Développement de synergies et gestion durable des sols.....	- 97 -
VI. 4. Apprentissage, adaptation et innovation des producteurs	- 98 -
VI. 5. Perspectives de développement de la recherche.....	- 98 -
Conclusion générale	- 100 -
Références bibliographiques	- 102 -

Liste des figures

Figure 1 : Résumé graphique de la problématique et de la démarche de la thèse	- 6 -
Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude et localisation des villages.....	- 21 -
Figure 3 : Classification ascendante hiérarchisée des facteurs de productions des EAF (avec des valeurs de probabilité -AU/BP - à différents niveaux).....	- 22 -
Figure 4 : Représentation graphique de la matrice de données d'enquêtes (variables-exploitations) réalisées sur les EAF du sud-ouest du Bassin arachidier du Sénégal.....	- 23 -
Figure 5 : Classification, en quatre groupes, des EAF du sud du bassin arachidier du Sénégal	- 24 -
Figure 6 : Classification en arbre de décision (CART) des facteurs qui affectent la teneur en C-organique du sol	- 65 -
Figure 7 : Classification en arbre de décision (CART) des facteurs qui affectent le taux de phosphore du sol	- 67 -
Figure 8 : Contribution des variables dans la construction des trois dimensions.....	- 69 -
Figure 9 : Corrélation entre les variables majeures de fertilité chimique des sols dans l'ACP	- 70 -
Figure 10 : Classification des sols des traitements en trois groupes	- 71 -
Figure 11 : Distribution map of plots based on the frequencies of weed species.....	- 88 -
Figure 12 : Principal component analysis based on frequencies of weed species on plots.....	- 89 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents types d'EAF produisant du <i>Jatropha</i> du sud-ouest du bassin arachidier du Sénégal.....	26 -
Tableau 2 : Assolement (en ha) et principales cultures des exploitations productrices de <i>Jatropha</i> du sud-ouest du bassin arachidier.....	26 -
Tableau 3 : Rendements moyens (en kg.ha ⁻¹), par village, des cultures de mil et d'arachide.....	28 -
Tableau 4 : Rendements moyens (en kg.ha ⁻¹), par type d'exploitation, des cultures de mil et d'arachide -	28 -
Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques du sol des sites d'expérimentation en milieu paysan ...	39 -
Tableau 6 : Composition chimique (en % de la MS) des fumures organiques utilisées par les producteurs.....	40 -
Tableau 7 : Rendements moyens annuels (en kg.ha ⁻¹) des cultures de mil et d'arachide.....	42 -
Tableau 8 : Production annuelle de biomasse de <i>S. hamata</i> (en kgMS.ha ⁻¹) après établissement de la culture.....	43 -
Tableau 9 : Composition chimique et qualité fourragère de la biomasse aérienne de <i>S. hamata</i>	44 -
Tableau 10 : Teneur en minéraux (en g/kg MS) du fourrage de <i>S. hamata</i>	45 -
Tableau 11 : Quantités moyennes (en kg.ha ⁻¹) de biomasse végétale utilisée pour constituer le couvert végétal des traitements.....	54 -
Tableau 12 : Production cumulée de mil des systèmes de cultures.....	56 -
Tableau 13 : Effets de la fumure organique et du recépage sur le rendement (kg.ha ⁻¹) de mil.....	56 -
Tableau 14 : Poids de 1000 grains de mil (g) des traitements.....	57 -
Tableau 15: Performances moyens de production d'arachide des systèmes de cultures.....	58 -
Tableau 16 : Effets du recépage et de la fumure organique sur le rendement gousses (kg.ha ⁻¹).....	58 -
Tableau 17 : Développement et production de biomasse de <i>S. hamata</i> en année d'installation (Année 2012).....	59 -
Tableau 18 : Production moyenne (kg MS.ha ⁻¹) de biomasse de <i>S. hamata</i> après installation de la culture.....	59 -
Tableau 19 : Effets du recépage et de la fumure organique sur la production de biomasse de <i>S. hamata</i> en 3 ^e année (2014) de rotation (en kg MS.ha ⁻¹).....	60 -
Tableau 20 : Effets du recépage et de la fumure organique sur la production de fane d'arachide (kg MS.ha ⁻¹).....	60 -
Tableau 21 : Effet de la fumure organique et du recépage sur la biomasse de tiges (kg MS.ha ⁻¹).....	61 -
Tableau 22 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en minéraux (en %).....	62 -
Tableau 23 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en matières protéiques totales (en %)-	62 -
Tableau 24 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en cellulose brute (en %).....	63 -
Tableau 25 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur (en %) en ADF (fibres au détergent acide).....	63 -
Tableau 26 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur (en %) en NDF (fibres au détergent neutre).....	63 -
Tableau 27 : Effets de la fumure et du recépage sur la digestibilité (<i>in vitro</i>) de la matière organique du fourrage (en %).....	64 -
Tableau 28 : Variation (Δ) des principaux paramètres de fertilité chimique des sols.....	66 -
Tableau 29 : Estimated quantity of litter (kg ha ⁻¹) and cover rate (%) obtained using one-third of the <i>S. hamata</i> biomass and all the millet stems produced after the second year of cultivation.....	81 -
Tableau 30: Vegetative soil cover by <i>S. hamata</i> (%) measured at the end of the third year of cultivation in crop rotations according to the applied treatments.....	82 -
Tableau 31 : Contribution (%) of <i>S. hamata</i> to the biovolume of the vegetation at the end of the cycle -	83 -
Tableau 32 : Frequency of weed species combined with <i>S. hamata</i> vegetation in cut back (CB) and uncut (UC) plots.....	84 -

Tableau 33 : Variation in the diversity (H) and equitability (E) index in the crop rotations.....- 87 -
Tableau 34 : Production (kg ha⁻¹) of the total phytomass of weed species in the different crop rotations
.....- 87 -
Tableau 35 : Millet and peanut yields (kg ha⁻¹) measured in the third year of experimentation.....- 90 -

Liste des abréviations

ACP – Analyse en composantes principales
ADF – Acide Detergent Fiber
ADL – Acide Detergent Lignin
AFO – Application de fumure organique
ANOVA – Analyse de la variance
AU – Approximately Unbiased
BP – Bootstrap Probability
CAH – Classification ascendante hiérarchisée
CART - Classification And Regression Tree
CASEDMORT – Digestibilité in vitro (cellulase) de la matière organique
CEC – Capacité d'échange cationique
CEL – Cellulose brute
DSS – Direct seeding cropping systems
E – Indice d'équitabilité
EAF – Exploitation agricole familiale
FAO – Food and Agriculture Organization
FPTF – Fédération des Producteurs de Tabanani (*Jatropha curcas* L.) de Foundiougne
H – Indice de diversité
H.J – Homme-jour
HSD – Honestly Significant Difference
MLG – Modèles linéaires généralisés
MM – Matières minérales
MPT – Matières protéiques totales
MS – Matière sèche
NDF – Neutral Detergent Fiber
OP – Organisations villageoises de Producteurs
PB – Protéines brutes
PBD – Protéines brutes digestibles
SAFO – Sans application de fumure organique
SCV – Semis sous couvert végétal
STA – Systèmes de culture traditionnels améliorés
UBT – Unité Bétail Tropic

Introduction générale

L'essoufflement de la croissance agricole et les fortes demandes sociales enregistrées dans les pays d'Afrique subsaharienne (Aune et Bationo, 2008 ; Piraux 2000 ; Dièye et Guèye, 1998) incitent à repenser les systèmes de production qui sont pratiqués dans cette région et les services de l'agriculture pour les populations. Au Sénégal, cette réflexion sur les nouvelles formes d'agriculture accorde la primauté aux exploitations familiales du fait de la part de la population concernée (60 % des actifs), des superficies concernées (95 % des terres agricoles) (MAER, 2009) et de son potentiel de redynamisation et d'innovation (Penot et al., 2015 ; Coulibaly et al., 2012). Ces exploitations familiales pratiquent principalement des systèmes de production agropastoraux extensifs ou peu intensifiés, très dépendants de la pluviométrie et dont les contraintes climatiques sont exacerbées par la fertilité réduite des sols (Piraux, 2000). Dans le bassin arachidier du Sénégal qui concentre 40% des superficies cultivées et plus du tiers de la population (Sakho, 2009; Piraux, 2000), ces systèmes de production sont basés sur la rotation arachide-mil et l'élevage de bovins (Dione et al., 2008 ; Piraux, 2000 ; Dièye et Guèye, 1998). Cependant, les synergies entre les productions végétales et l'élevage sont faiblement mises en valeur (absence ou faiblesse de la fumure organique, faible utilisation du fourrage produit au champ pour l'alimentation animale, etc.) ; elles portent essentiellement sur l'utilisation de la force animale pour le transport et les opérations culturales. Les faibles niveaux de fertilisation organique des champs, combinés à la pratique de la culture continue, affectent négativement la fertilité des sols (Bationa & Buerkert, 2001; Dièye et Guèye, 1998 ; Landais et Lhoste, 1990) et la productivité agricole, qui demeure insuffisante pour satisfaire les besoins des populations (Bado et al., 2007). En effet, la chute de la production agricole est liée à la dégradation de la fertilité des sols et la baisse de la pluviométrie, combinée à une variabilité plus importante (Doso, 2014 ; Kanté et al., 2007). Par ailleurs, la faible productivité du cheptel (reproduction, productions de lait, de viande et de déjections animales), accentuée par le déficit fourrager à l'échelle de l'exploitation, contraint à des modes de conduite alimentaire extensifs des ruminants domestiques (Piraux, 2000).

Pour créer les synergies entre les cultures et l'élevage et favoriser la durabilité de ces systèmes de production, une approche multisectorielle de la recherche est nécessaire. Par ailleurs, la faible disponibilité de la fumure organique, pour améliorer la fertilité des sols et soutenir durablement la production, incite à la combinaison de plusieurs voies d'amélioration et de gestion de la fertilité. A cet égard, le recyclage des résidus de culture en mulch, l'intégration d'une légumineuse de couverture et la réduction du travail du sol sont des axes de recherche intéressants, pour améliorer et préserver la matière organique du sol (Blanchard et al., 2014). Ceux-ci combinés à l'amélioration de la disponibilité du fourrage contribuent à l'augmentation des quantités de déjections produites à l'échelle de l'exploitation familiale. Ces pratiques qui visent à améliorer la teneur en matière organique du sol sont essentielles pour le développement de systèmes de culture durables (Craswell and Lefroy, 2001; Razafimbelo et al., 2006). Elles sont pour l'essentiel des pratiques relevant de l'agriculture de conservation qui repose sur trois principes fondamentaux : (i) une perturbation minimale du sol, (ii) une protection du sol par un couvert végétal permanent et (iii) une diversification des cultures par des rotations et/ou des associations culturales. Chacune de ces pratiques offre plusieurs services écologiques, socio-économiques et/ou de production. Par exemple, l'association d'une culture principale avec une légumineuse de couverture permet, en plus de la production de fourrage pour nourrir les animaux, de protéger le sol contre les érosions (Lahmar et al., 2012) et d'améliorer sa fertilité par la fixation symbiotique d'azote et l'apport de matières organiques racinaire et foliaire permettant ainsi d'agroécologiser le système de production en tirant parti des interactions entre composantes de l'agroécosystème augmentées par l'inclusion de la plante de couverture (Bonaudo et al, 2014 ; Nacro et al., 2010 ; Bado et al., 2007 ; Zahran, 1999 ; Groot et al., 1998). Cependant, ces effets sont variables selon les caractéristiques structurelles des exploitations familiales et des conditions pédoclimatiques des écosystèmes cultivés (Djamen Nana et al., 2015). En effet, la culture principale et la plante de couverture peuvent entrer en compétition lorsque les ressources sont insuffisantes, réduisant ainsi les performances de production (Baldé, 2011). Le choix de la plante de couverture est essentiel pour assurer un fonctionnement équilibré et durable du système ainsi qu'une productivité optimale. Les recherches menées dans le cadre de cette thèse ont porté sur la légumineuse

Stylosanthes hamata (L.) Taub., choisie pour ses capacités d'adaptation aux conditions du bassin arachidier et ses potentialités fourragère et de gestion de la fertilité des sols (Nacro et al., 2010 ; Osafo et al., 2008 ; Odunze, 2002). En effet, *S. hamata* a montré des intérêts considérables, dans différents écosystèmes tropicaux, pour (i) l'amélioration de la fertilité des sols, à travers la fixation symbiotique d'azote et ses apports en matières organiques foliaires et racinaires (Bado et al., 2007), (ii) et la production de fourrage de qualité pour l'alimentation des animaux (Ogunbode et Akinlade, 2012; Akinlade et al., 2008; Osafo et al., 2008). Toutefois, de fortes variabilités des performances de production des systèmes de culture en SCV de *S. hamata* sont souvent observées, en milieu paysan (Baldé, 2011). Dès lors, il convient d'en évaluer la pertinence, de dégager les conditions de réalisation, d'identifier les itinéraires techniques à mettre en œuvre et les risques pour l'agriculteur qui peuvent limiter l'adoption, déterminer le rejet ou l'adaptation des innovations proposées.

Dans ce contexte ont été réalisés les travaux de thèse de doctorat, dans le cadre d'un projet de recherche interuniversitaire (dénommé PIC Jatropha) visant à évaluer la pertinence et à promouvoir les pratiques agroécologiques, notamment celles d'agriculture de conservation. Les axes de recherche développés par le projet portaient sur (i) l'intégration de *Jatropha curcas* dans les champs, selon des dispositifs de culture en couloir ou en bordure comme haies vives défensives, (ii) le développement des systèmes de culture en SCV de *S. hamata*, (iii) la fertilisation organique et la gestion durable de la fertilité des sols et (iv) la production et la qualité du fourrage au niveau des exploitations familiales. Les trois derniers axes de recherches constituent le cœur de la thématique de la thèse dont les principaux résultats sont présentés sous forme de dissertation organisée en sept parties, en sus de l'introduction et de la conclusion. La question de recherche et la démarche d'investigation sont abordées à la suite de la partie introductive ; suivies par le premier chapitre qui fait une synthèse des possibilités d'amélioration des systèmes de production agropastoraux en Afrique soudano-sahélienne par le développement du SCV de *S. hamata*. Le second chapitre présente les résultats de typologies des exploitations agricoles familiales (EAF) et des systèmes de production pratiqués dans le sud du bassin arachidier. Sur la base de la structuration des EAF établie et des systèmes de production, des pratiques agro-écologiques ont été identifiées, à travers une démarche de co-conception, puis testées en milieu paysan (chapitre 3). Les chapitres 4 et 5 traitent des résultats de l'expérimentation en station, de mise au point de systèmes de culture en SCV de *S. hamata*. Le chapitre 4 est consacré aux performances de production et à l'évolution de la fertilité chimique du sol dans les systèmes de culture en SCV. Le chapitre 5 se rapporte à l'analyse de l'enherbement et à la gestion des adventices dans ces systèmes de culture. La discussion de l'ensemble des résultats d'expérimentations en station et en milieu paysan est réalisée dans le chapitre 6.

Problématique et démarche de recherche

Le questionnement que pose la recherche agricole au Sénégal est double : (i) technique, pour apporter des solutions durables de production (rendement, ressources productives, résilience systèmes de production, etc.) et structurel, lié à la capacité productive, à l'organisation et au fonctionnement des EAF, principale unité de production agricole. Celles-ci se caractérisent par une faible capacité d'investissement pour l'acquisition d'intrants (semences, engrais, pesticides, aliments de bétail, etc.) et intensifier leurs productions. Dans ce contexte, les pratiques agroécologiques seraient la seule voie (technique, économique, environnementale) pour soutenir la production et préserver les ressources productives (Nicholls and Altieri, 2018). Il est reconnu que les technologies agroécologiques permettent de répondre à plusieurs questions de développement agricole et durable (Nicholls and Altieri, 2018 ; Bonaudo et al., 2014 ; Baudron et al., 2012). La recherche sur les pontualités des technologies agroécologiques est guidée par l'hypothèse selon laquelle « l'utilisation de *S. hamata* comme plante de couverture peut contribuer à améliorer l'alimentation des animaux et la gestion de la fertilité des sols, sans compromettre les performances de production de la culture principale ». Elle vise à répondre de manière spécifique aux questions suivantes :

- (i) Comment diversifier dans un contexte agroécologique du bassin arachidier ?
- (ii) Quels sont les synergies et le flux de services potentiels ?
- (iii) Comment gérer durablement voire améliorer le potentiel productif des ressources (terre et eau, notamment) ?

Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de changer de paradigme et s'orienter vers les processus qui réduisent les pertes et qui favorisent les flux et le recyclage de matières (Van Zanten, Van Ittersum, De Boer, 2019). En effet, les pratiques traditionnelles de brulis de la matière organique végétale au champ, par exemple, ne correspondent pas aux modèles de gestion et de transformation de la matière qui minimisent les pertes. L'exploration des voies d'amélioration potentielles permet de dégager deux circuits : le premier consiste à la restitution de la matière organique végétale au sol (tiges de céréales, racines, etc.) et le second appelle à la valorisation, en alimentation animale, de la biomasse végétale et le transfert des déjections d'animaux vers les champs. Ces perspectives de reconstruction des systèmes de production devraient contribuer à plus d'efficacité, de diversification, de synergies et de résilience, à travers l'amélioration des relations entre le sol, les animaux et les cultures, sur la base des principes agro écologiques (Bonaudo et al., 2014). Les services obtenus sont diversifiés et maximisés lorsque le système est considéré dans sa globalité, avec ses différentes composantes et leurs interactions (compensation des pertes de production par la valeur ajoutée générée par une nouvelle production, par exemple). Toutefois, même dans un circuit fermé tel que la relation plante-animaux-sol, des pertes subsistent et des apports supplémentaires de nutriments sont nécessaires.

La complexité de la question de la recherche agricole nécessite une approche pluridisciplinaire combinant des expérimentations en station et une recherche participative en partenariat avec les producteurs. Cette approche participative de recherche qui contribue au renforcement des capacités techniques et à la responsabilité des agriculteurs (Nicholls and Altieri, 2018) semble plus adaptée pour répondre aux problèmes spécifiques et favoriser l'adoption des solutions promues (Lhoste, 994). En effet, les relations entre la recherche agricole et le développement rural montrent que l'adoption, par les agriculteurs de pratiques innovantes issues de la recherche n'est pas évidente (Penot et al., 2015). Ceux-ci ont tendance à détourner leur intérêt des technologies qui ont peu d'effets immédiats (Hauswirth et al., 2015 ; Baldé, 2011 ; Verachttert et al., 2009) ou à les adapter à leurs situations (Dos Santos et al., 2015 ; Penot et al., 2015). La recherche en partenariat qui vise la co-conception de technologies permet de prendre en considération la diversité des situations des EAF (Dugué et al., 2015 ; Tittonell et al., 2010), le savoir-faire des agriculteurs et leur capacité à innover de manière spontanée (Penot et al., 2015). Elle a été adoptée dans le cadre de cette thèse et conduite avec le partenariat les agriculteurs de la Fédération des Producteurs de Tabanani de Foundiougne (FPTF). Le choix de cette organisation de producteurs motivé essentiellement par sa structure organisationnelle permettant d'accompagner le travail de recherche action souhaité et les prédispositions des agriculteurs de l'organisation à s'engager dans la voie agroécologique. En effet, la FPTF promeut un modèle de développement harmonieux des territoires fondé sur l'agriculture et les ressources

énergétiques renouvelables, notamment le développement des systèmes en polycultures, l'utilisation des agrocarburants pour le fonctionnement de plateformes multifonctionnels, etc. Dans le cadre de ce partenariat, il s'est agi de mener des investigations préalables, à travers des enquêtes, pour établir une typologie structurelle et fonctionnelle des EAF de la FPTF et de leurs systèmes de production. Les résultats de ces investigations ont servi à orienter la stratégie à développer pour générer des solutions adaptées et assurer l'effectivité de la participation des agriculteurs à tous les niveaux de recherche. Ainsi, deux organes, de décisions et de mise en œuvre, ont été mis en place pour définir, réaliser et suivre les tests en milieu paysan : un comité de pilotage et un comité de producteurs pilotes. En parallèle à cet essai en milieu paysan, une expérimentation en station a été réalisée, pour garantir une maîtrise de certains facteurs (sol, eau, etc.) et mieux évaluer les effets des traitements.

La recherche de possibilités de développement de systèmes en semis sous couvert végétal de *S. hamata* a été réalisée en association avec les principales cultures du bassin arachidier (mil et arachide). Des modalités d'installation de *S. hamata* en association avec l'arachide ou le mil et en culture pure ont été testées, pour déterminer celles qui favorisent l'établissement de stylosanthes. En effet, la croissance de *S. hamata* en année d'installation est très lente (Coulibaly, 1996), dépendant en partie de la réussite de son installation et de nodulation. L'association stylosanthes—arachide à l'installation de la légumineuse de couverture est sous-tendue par l'hypothèse qu'elle devrait accélérer le processus de nodulation chez le stylosanthes, surtout si les deux cultures sont colonisées par les mêmes souches de rhizobia. L'association stylosanthes—mil vise particulièrement les services d'amélioration fertilité du sol et de la nutrition azotée de la céréale. La gestion de cette fertilité du sol a nécessité une compensation des exportations de produits (récolte et fourrage) par la restitution des résidus de culture et l'application de la fumure organique, d'une part, et la réduction du labour pour limiter le processus de minéralisation de la matière organique, d'autre part. Le protocole expérimental a été adapté en cours d'expérimentation, avec l'application de la fumure organique et l'introduction du recépage de la biomasse de *S. hamata* et des adventices, respectivement pour compenser les exportations de nutriments (récoltes et fourrage) et réduire la concurrence de stylosanthes vis-à-vis des cultures.

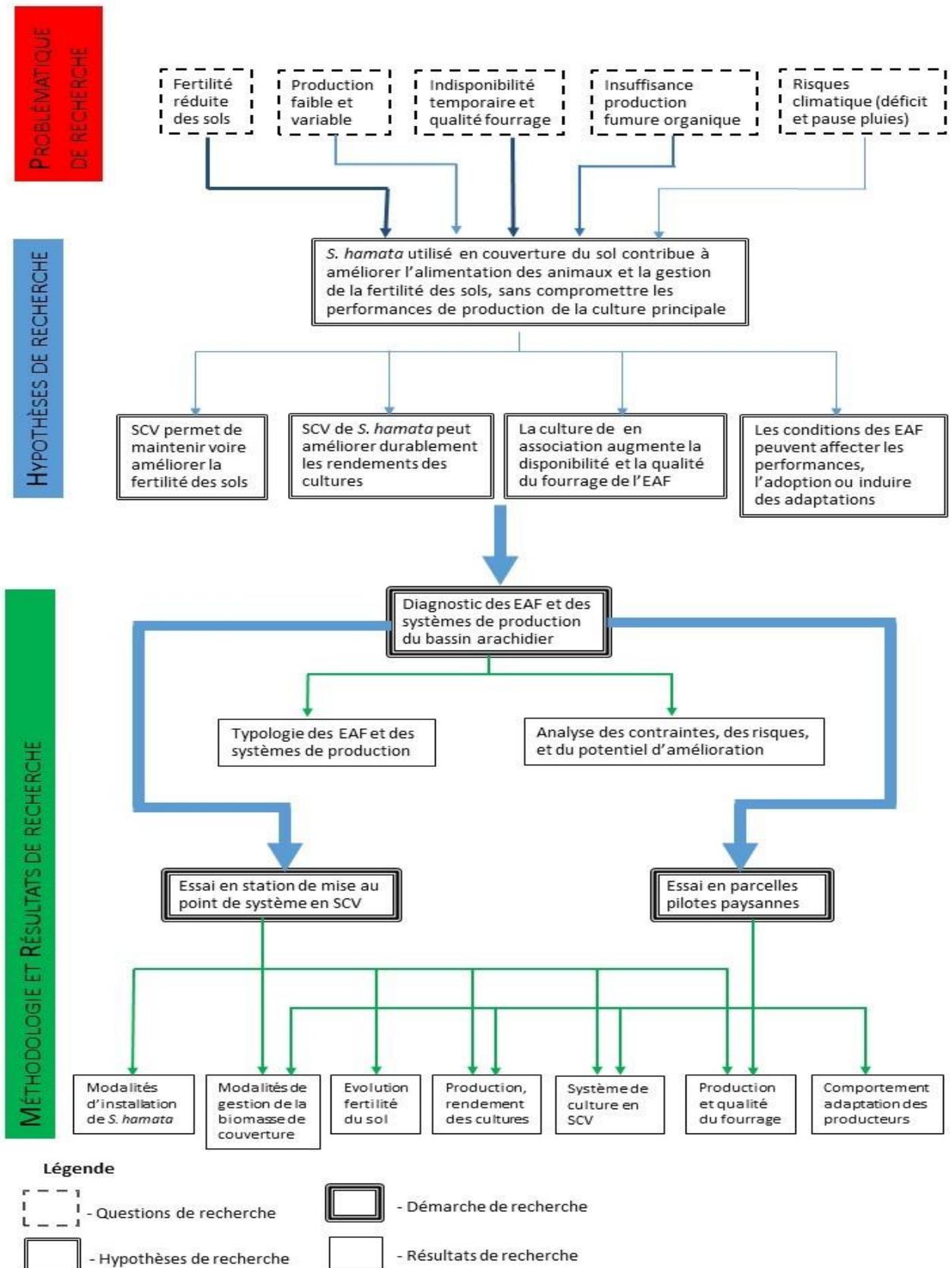


Figure 1 : Résumé graphique de la problématique et de la démarche de la thèse

Chapitre I

**Amélioration des systèmes de production mixtes en
Afrique soudano-sahélienne. Rôle de l'espèce
Stylosanthes hamata (L.) Taub. (synthèse
bibliographique)**

Chapitre I

**Improvement of mixed farming systems in Sudano-
Sahelian Africa - Role of the species *Stylosanthes*
hamata (L.) Taub (Review)**

Le chapitre premier de cette dissertation de thèse est une revue de la bibliographie qui a fait l'objet de publication en 2015 [*Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* (2015) 19 (3): 280-288]. Ce chapitre décrit les principales caractéristiques des systèmes de production pratiqués dans les régions soudano-sahélienne d'Afrique, leurs trajectoires et les défis alimentaires et de durabilité. Cette description est importante pour comprendre les mutations et les évolutions qui ont contribué à façonner les systèmes de production actuels. L'analyse des possibilités d'amélioration accorde un intérêt particulier aux pratiques agroécologiques visant à renforcer les synergies entre les composantes des systèmes de productions. Il documente des services diversifiés et les contraintes liés à l'intégration de *Stylosanthes hamata* dans les systèmes de production dans différentes régions du monde.

Résumé

En Afrique soudano-sahélienne, les systèmes de production agricole traditionnels ne permettent plus de subvenir aux besoins en nourriture des populations. Pour améliorer durablement la sécurité alimentaire des petites exploitations familiales, les pratiques agro écologiques sont de plus en plus promues par les organisations de recherche et de développement. Plusieurs études montrent que les performances de l'agriculture peuvent être améliorées de manière durable par le développement des synergies entre les de production végétales et animales. Parmi ces possibilités d'amélioration, l'intégration de *Stylosanthes hamata* (L.) Taub. dans les systèmes de production est une des voies les plus intéressantes. La légumineuse présente de nombreuses qualités susceptibles d'améliorer les performances des systèmes de culture dans lesquels elle est intégrée. En outre, elle permet une importante production de fourrage de qualité, à partir de la seconde année, utilisable pour l'alimentation des animaux. Toutefois, des contraintes phytosanitaires, techniques, environnementales et/ou socioéconomiques doivent être levées pour permettre une meilleure intégration de la culture dans les systèmes de production. L'intégration de *S. hamata* dans les systèmes de production des régions soudano-sahéliennes présente des avantages potentiels qui devraient motiver des investigations plus approfondies pour identifier les modalités adéquates de cette intégration.

Mots clés: agriculture, élevage, polyculture élevage, *Stylosanthes hamata*

Abstract

In Sudano-Sahelian Africa, the traditional farming systems are no longer able to meet the food needs of the populations. To sustainably improve the food security of small family farms, agro-ecological practices are increasingly promoted by the research and development organizations. Several studies have shown that agricultural productivity can be sustainably improved through a better integration of agriculture and livestock activities. One approach that is being considered is the integration in the farming systems of *Stylosanthes hamata* (L.) Taub; a herbaceous annual to short-lived perennial. This plant has the proven potential to enhance the performance of cropping systems in many ways. It also allows for the critical production of a high quality fodder for animal feed, from the second year after plantation onwards. However, phytosanitary, technical, environmental and / or socio-economic constraints should be lifted to allow a better integration of the crop in farming systems. Integration of *S. hamata* in farming systems of Sudano-Sahelian regions presents potential benefits that should motivate further investigation, to identify the adequate modalities of this integration.

Keywords: agriculture, animal husbandry, mixed farming, *Stylosanthes hamata*

Introduction

Plusieurs études traitent de la question de la durabilité des systèmes de production agricole en Afrique soudano-sahélienne (Bocquier et González-Garcia, 2010; Nacro et al., 2010; Piraux, 2000). Ceux-ci se caractérisent généralement par une très faible association, voire une dissociation, des activités de production végétale et animale et on y observe souvent une baisse chronique de leur capacité de production, du fait de la chute de la fertilité des sols. En effet, une fois mis en culture, les sols tropicaux tendent à voir leur productivité diminuer suite à la chute rapide de leur teneur en matière organique combinée à l'acidification et à l'apparition de déficiences en éléments nutritifs, notamment l'azote et le phosphore (Sunghongwise et al., 2011; Khouma et al., 2005). Le potentiel génétique des animaux d'élevage est mal exploité (Asongwed-Awa et Njoya, 2002), avec des pâturages naturels insuffisants et de mauvaise qualité nutritive en saison sèche (Toutain et al., 2009; Akinlade et al., 2008). La promotion des cultures fourragères classiques a eu un succès limité (Landais et Lhoste, 1990), du fait de l'augmentation du travail et de la technicité qu'elles requièrent et, dans certaines régions, de la saturation de l'espace rural. Pour inverser cette dynamique, plusieurs auteurs (Nacro et al., 2010; Piraux, 2000; Tarawali, 1998; Couty, 1991) s'accordent sur la nécessité de développer des systèmes de culture durables qui, en plus d'être performants, conserveraient le potentiel de production du milieu. L'intégration culture-élevage, en particulier, est gage de durabilité des systèmes de production tropicaux (Bocquier et González-Garcia, 2010; Lhoste, 2004); elle permet de répondre aux objectifs sociaux et économiques de la production et d'assurer une meilleure gestion des ressources. Cette perspective rend attractives les associations culturales de légumineuses fourragères et de céréales, surtout dans les régions à faible disponibilité foncière.

Les avantages qu'offre l'association d'une légumineuse avec une céréale sont nombreux et variés: amélioration de la fertilité du sol, principalement du fait de la fixation symbiotique d'azote au niveau des racines de la légumineuse, meilleure rétention de l'eau du sol, lutte contre l'érosion, lutte contre les mauvaises herbes, production de fourrage de qualité, économie d'énergie par la suppression partielle ou totale du sarclage, économie en intrants, etc. (Saito et al., 2010; Bocquier et González-Garcia, 2010; Chandra, 2009; Odunze, 2002). Les espèces du genre *Stylosanthes* sont des légumineuses tropicales particulièrement intéressantes pour leur haute valeur fourragère et leur capacité à améliorer la fertilité des sols de différents écosystèmes agropastoraux et forestiers tropicaux, (Chandra, 2009; Onyeonagu et Asiegbu, 2013). Parmi ces espèces, *Stylosanthes hamata* (L.) Taub. est, sans doute, la plus intéressante pour les régions sahéliennes et soudaniennes d'Afrique (Ogunbode S. M. & Akinlade J. A., 2012; Osafo et al., 2008). Ses utilisations fourragères concernent essentiellement les ruminants domestiques des régions tropicales où la disponibilité en fourrage de qualité n'est pas assurée tout au long de l'année (Ogunbode et Akinlade, 2012; Akinlade et al., 2008; Osafo et al., 2008; Omole et al., 2007; Asongwed-Awa et Njoya, 2002).

Des études menées récemment dans différentes parties du monde mettent également en évidence l'intérêt potentiel de *S. hamata* pour le développement de systèmes de culture en semis direct sous un couvert végétal permanent (Husson et al, 2008; Odunze 2002). Ceux-ci se définissent comme un ensemble de pratiques agricoles qui se caractérisent par l'absence de travail du sol, la couverture permanente du sol par une biomasse végétale et le semis direct à travers la couverture végétale protectrice.

Cette synthèse bibliographique présente les intérêts potentiels de l'espèce *S. hamata* pour améliorer durablement les performances des systèmes de production agricole mixtes des régions soudano-sahéliennes d'Afrique, et les voies possibles pour atteindre cet objectif au moyen de cette légumineuse.

I. 1. Caractéristiques des principaux systèmes de production mixtes des régions sahélo-soudaniennes d'Afrique

En Afrique sahélo-soudanienne, les activités culturales et l'élevage sont diversement associées ou entrent parfois en compétition, selon les contraintes et les opportunités locales (Lhoste, 2004). L'utilisation de la traction animale en milieu rural est la forme d'intégration la plus élaborée et la plus

répandue (Dièye et Guèye, 1998; Havard et al., 2004; Lhoste, 1987; Sempore et al. 2013). Cependant, même dans ce cas, les transferts de matières organiques (fumier, paille et fourrages, notamment) entre les champs et les étables sont généralement très faibles. Sempore et al. (2013) rapportent que, dans la région ouest du Burkina Faso, moins de 20% des terres cultivées reçoivent une fumure organique et que, quand elle est pratiquée, l'application de fumure organique ne dépasse généralement pas la dose d'une tonne par hectare. Cela se traduit par une chute continue de la teneur en humus des sols (Odonze, 2002; Piraux, 2000). Ainsi, au Sénégal, le suivi de ce paramètre dans les sols du bassin arachidier montre une baisse importante, de 30% sur 12 ans et près de 66% sur 46 ans (Khouma et al., 2005). Onana et al. (2007) rapportent des variations similaires du stock de matière organique dans des sols cultivés en continu au Nord-Cameroun : 50 % de pertes après 35 années de culture continue. Par ailleurs, l'adoption massive de la culture attelée et l'accroissement de la population rurale, en favorisant l'extension des surfaces cultivées et la réduction drastique, voire la disparition, de la jachère ont accentué la chute de la fertilité des sols et entraîné des réductions importantes des rendements agricoles (Lhoste 1987; Milleville et Serpantié, 1994). La diminution rapide de la teneur en matière organique des sols tropicaux, suite à leur exploitation traditionnelle, est un des principaux facteurs limitant leur potentiel de production. Selon Pieri (1989), cité par Groot et al. (1998a), et Breman et Kessler (1995), quand la teneur en humus tombe en dessous d'un seuil critique, on assiste à un effondrement des rendements. Ce seuil se situe entre 3 et 5 % de la teneur totale du sol en argile et en limon. Ainsi, la nécessité d'augmenter le taux de matière organique du sol est souvent évoquée pour améliorer la productivité et la durabilité de ces systèmes de production (Razafimbelo et al., 2006).

L'agriculture, essentiellement pluviale et pratiquée sur des superficies modestes, est dominée par la culture de céréales, souvent destinées à l'autoconsommation, et une, ou plusieurs, culture de rente. Les principales cultures des régions sahéenne et soudanienne d'Afrique sont le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.), le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), le niébé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) et l'arachide (*Arachis hypogea* L.). En général, les systèmes de culture rencontrés en Afrique de l'ouest utilisent peu d'intrants et une main d'œuvre importante, souvent familiale. Dans de tels systèmes, l'extension des cultures est la principale stratégie pour répondre à une demande sociale croissante en produits vivriers, du fait d'une démographie galopante. Aune et Bationo (2008) rapportent que l'accroissement de la production de grain du mil, observée au Niger et au Mali lors des décennies précédentes, est plus lié à l'extension des cultures sur de nouvelles terres et au raccourcissement de la durée de la jachère qu'à une amélioration des rendements agricoles. Ces mêmes auteurs rapportent qu'au Burkina Faso, l'augmentation de la production résulte d'une extension des cultures et d'une amélioration des rendements par une intensification agricole. En effet, en Afrique de l'Ouest, différentes tendances d'évolution des rendements du mil s'observent selon le pays considéré. Au Niger et au Mali, les rendements du mil ont tendance à se stabiliser autour d'une moyenne de 500 kg.ha⁻¹; au Burkina Faso un accroissement de 500 à 750 kg.ha⁻¹ est observé sur 30 ans (1976-2005); au Sénégal, une diminution des rendements du mil s'observe depuis 1995, après une période d'accroissement sur les 30 années antérieures (Aune et Bationo, 2008). Toutefois, là où elle s'observe, la vitesse d'augmentation de la production est plus faible que la croissance des populations de cette région entraînant une diminution de la production par habitant. Des déficits céréaliers fréquents, en milieu rural, sont rapportés par plusieurs auteurs (Dièye et Guèye, 1998; Piraux, 2000).

L'élevage y est conduit selon différents systèmes extensifs, transhumant ou sédentarisé. L'alimentation des animaux se fait essentiellement sur pâturages naturels caractérisés par une pénurie saisonnière et une qualité médiocre du fourrage en saison sèche. Les résidus des cultures et le fourrage aérien complètent les rations ingérées sur prairies naturelles en saison sèche (Bécher et al. 2009; Lhoste 2004). Dièye et Guèye (1998) rapportent qu'en région agropastorale du bassin arachidier du Sénégal, les résidus de culture et les coproduits de récolte constituent 30 à 50% des rations alimentaires des ruminants domestiques en saison sèche. Toutefois, un déficit fourrager de plus 21%, soient 481 kg de matière sèche (MS) par Unité bétail tropical (UBT), a été mis en évidence par Guérin et al. (1985) dans cette région. Ces auteurs estiment que la conduite alimentaire des animaux sur pâturage naturel ne permet pas une ingestion *ad libitum* et que d'autres ressources alimentaires sont nécessaires pour compléter la ration ingérée au pâturage. La productivité du cheptel, notamment la croissance numérique et les productions de viande et de lait, est fortement limitée par l'insuffisance et

la qualité médiocre du fourrage disponible sur parcours. Kaasschieter et al. (1998) rapportent des gains de poids moyen quotidien, en élevage extensif de bovins tropicaux, de 70 à 150 g, largement en dessous de leur potentiel génétique estimé de 750 g. Ces auteurs soulignent également des performances de production de 500 à 800 kg de lait, obtenue en 246 jours de lactation en moyenne, pour des aptitudes de 1000 à 2000 kg de lait, et des différés de 10 à 36 mois de l'âge du premier vêlage, liés à une mauvaise alimentation.

I. 2. Intérêts de l'espèce *S. hamata* pour améliorer les performances de systèmes de production mixtes

Le genre *Stylosanthes* regroupe plusieurs dizaines d'espèces qui se développent sous divers climats tropicaux et sur des sols très variés. Elles sont généralement assez tolérantes de la sécheresse et conviennent parfaitement aux sols pauvres et acides (Ogunbode et Akinlade, 2012), caractéristiques des régions tropicales d'Afrique. *S. hamata*, *S. guianensis* (Aubl.) Sw., *S. scabra* Vogel, *S. seabrana* B.L. Maass & t'Mannetje, sont les espèces considérées comme les plus importantes en Afrique tropicale et subtropicale (Munaut et al., 1998; Ogunbode S. M. & Akinlade J. A., 2012; Osafo et al., 2008).

2. 1. Intérêts édaphiques de *S. hamata*

S. hamata est une légumineuse vivace, semi-érigée, pouvant se comporter en plante annuelle dans plusieurs systèmes de production, surtout en conditions arides. Elle est adaptée aux régions recevant entre 500 et 2000 mm de pluies; l'optimum de précipitation se situe entre 700 et 900 mm. La tolérance de *S. hamata* à la sécheresse est meilleure dans des sols avec une importante proportion de sable grossier (Coulibaly, 1996). L'essentiel des cultivars est adapté à des sols dont le pH varie de 5,8 à 8 présentant des textures diverses. Toutefois, les valeurs faibles du pH de la solution du sol limitent la durée de vie du *Rhizobium* et sa persistance dans le sol et sont défavorables à la nodulation (Zahran, 1999). De même, les sols lourds à texture argileuse sont impropres à la culture de *S. hamata*. La concentration en phosphore assimilable de la solution du sol de 1 μM est suffisante pour un bon développement de cette espèce, contre 3 μM pour *S. humilis* et 1,2 μM pour *S. guianensis* (Smith et al., 1990). Le seuil de déficience en phosphore assimilable des sols tropicaux d'Afrique établi par Compaoré et al. (2001), cités par Nacro et al. (2010), est de 5 mg/kg de sol. Le stress lié à un déficit de phosphore du sol favorise chez *S. hamata* un fort développement du système racinaire aux dépens de la biomasse aérienne, sans pour autant améliorer la fixation symbiotique d'azote (Smith et al., 1990). L'absorption du phosphore par la plante demande 10 fois plus de biomasse racinaire que l'absorption de l'azote ou de l'eau (Groot et al., 1998b). D'une manière générale, les espèces de *Stylosanthes* répondent très favorablement à la fertilisation. L'apport d'engrais phosphatés dans le sol, en plus d'augmenter la biomasse aérienne, améliore la nodulation et la fixation d'azote. Cela se traduit par une forte augmentation de la teneur en azote total et en phosphore dans la plante. L'azote fixé par symbiose représente 50 à 58% de l'azote total de *S. hamata* sur sol amendé en P (Sungthongwises et al., 2011). Il faut également noter que *S. hamata* montre une résistance partielle aux principales souches de *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. & Sacc., responsable de l'antracnose, contrairement à la plupart des espèces du genre *Stylosanthes* (Cameron et al., 1997; Chakraborty, 2004; Osafo et al., 2008).

En région soudano-sahélienne, les pertes de constituants du sol du fait de l'érosion hydrique sont particulièrement importantes, surtout en début de saison pluvieuse lorsque les terres sont dénudées et que la violence des orages déstructure les horizons de surface. La couverture vivante du sol par *S. hamata* permet à la fois de protéger le sol contre l'érosion, d'augmenter sa teneur en azote et de rehausser sa teneur en matière organique. A partir d'essais réalisés en zone soudanienne au Burkina Faso, sur des sols ferrugineux tropicaux à texture sablo-limoneuse, Nacro et al. (2010) ont montré une amélioration de la teneur en matière organique de l'horizon de surface du sol (< 20 cm), de 0,61% à 0,79%, après deux années de couverture permanente du sol par *S. hamata*. Par son apport massif de matière organique dans le sol, sous forme de litière, de racines mortes et d'exsudats racinaires, *S. hamata* permet également d'améliorer le niveau de carbone des sols en profondeur. Pour des essais réalisés en zone soudano-sahélienne au Mali, Groot et al. (1998b) rapportent des densités racinaires de *S. hamata* élevées en 2^e année de culture, de 0,96 à 3,13 cm de racines par cm³ de sol, pour l'horizon

de surface (< 20 cm), et de 0,21 à 1,45 cm de racines par cm³, pour les horizons plus profonds (20 à 140 cm), qui permettent la production de biomasses racinaires de 3596 kg.ha⁻¹an⁻¹ à 4161 kg.ha⁻¹an⁻¹, en fonction de la fertilité du sol. L'effet de la couverture du sol par *S. hamata* sur l'amélioration du niveau de matière organique est d'autant plus marqué que la fraction fine du sol, argiles et limons, est importante. Ce qui favorise une des principales composantes de la fertilité. En effet, la teneur en carbone de la fraction fine du sol (0-50 µm) influence favorablement la somme des bases échangeables et la capacité d'échange cationique du sol (Pallo et al., 2006).

La fixation symbiotique est une source importante d'azote (N) qui permet d'améliorer la teneur des sols en cet élément. Les quantités d'azote fixées, dans différents systèmes de culture et pâturages impliquant une ou des légumineuses, relatées par Zahran (1999), s'établissent entre 200 et 300 kg N.ha⁻¹ annuellement. L'estimation des quantités d'azote atmosphérique fixées par la symbiose *Rhizobium*-légumineuse peut être différente selon la méthode d'évaluation utilisée. Les auteurs s'accordent cependant sur l'effet bénéfique d'un antécédent cultural de légumineuse fixatrice sur les rendements de la céréale subséquente, comparable à des doses de fertilisations azotées allant de 30 à 80 kg par ha (Zahran, 1999). L'utilisation pratique de la fixation biologique d'azote est d'une importance notoire surtout pour les petites exploitations familiales d'Afrique tropicale qui ne disposent pas de ressources suffisantes pour fertiliser convenablement leurs champs.

Ses effets très positifs sur la fertilité du sol font de *S. hamata* une plante de couverture très intéressante pour le développement de systèmes de culture en semis direct dans un couvert végétal permanent (SCV) dans les zones subhumides (Husson et al. 2008). En plus de son rôle protecteur contre l'érosion et la recharge du sol en matière organique, elle permet d'inhiber le développement des mauvaises herbes (Odunze, 2002). D'après Chandra (2009) et Onyeonagu et Asiegbu (2013), les espèces de *Stylosanthes*, notamment *S. hamata* et *S. guianensis*, contrôlent mieux les mauvaises herbes que la plupart des légumineuses de couverture. Par ailleurs, cette capacité de couverture du sol de *S. hamata* permet de conserver l'humidité du substrat et favorise la croissance de la culture associée (Chandra, 2009). Le SCV permet d'améliorer les rendements de la céréale cultivée (Saito et al., 2010) tout en contribuant à la gestion de la fertilité des sols (Chandra, 2009; Razafimbelo et al., 2006). Sur des essais de culture sous couvert végétal réalisés en région semi-aride du Nigéria, Odunze (2002) a montré que la couverture du sol au moyen de *S. hamata* permettait d'augmenter les rendements en grain de maïs de 12 à 29%. En région tropicale semi-aride, l'association *Stylosanthes*-céréale est une des méthodes les moins onéreuses pour l'établissement de la légumineuse, malgré sa moins bonne installation par rapport à la culture pure (Asongwed-Awa et Njoya, 2002).

2. 2. Intérêts fourrager et nutritionnel pour les animaux

Pour les systèmes agropastoraux, l'intérêt de la culture de légumineuse s'évalue principalement en termes de capacité à satisfaire les besoins fourragers des animaux domestiques. Les fourrages sont la principale ressource alimentaire des ruminants en région tropicale. La pérennité des systèmes d'élevage de ruminants domestiques, dans ces régions, passe nécessairement par la sécurisation des systèmes d'affouragement (Bocquier et González-García, 2010). La biomasse fourragère produite par *S. hamata* dépend de plusieurs facteurs dont les conditions de culture (fertilité du sol et pluviométrie), le système de culture (pure ou en association) et l'année de production. Les espèces de *Stylosanthes*, notamment *S. hamata*, ont une production fourragère modeste en année d'installation (Chandra, 2009; Coulibaly, 1996). En conditions pluviométriques de 500 mm.an⁻¹, la biomasse produite par *S. hamata*, en seconde année de culture, est estimée à 3,8 t MS par ha (Coulibaly, 1996). En zone sahélienne et en conditions de pluviométrie normale, Breman et al. (1998) estiment la production de *S. hamata* cv. Verano à 4,1 t MS par ha, sur un sol sableux, contre 5,4 t MS par ha, sur un substrat sablo-limoneux; pour les mêmes textures de sols, la biomasse obtenue en zone soudanienne est de 6,6 t MS par ha et 9,6 t MS par ha, respectivement. La biomasse du couvert de *S. hamata* est relativement stable à partir de la seconde année contrairement à *S. scabra* et *S. seabrana* qui produisent des biomasses de plus en plus importantes au fil des années (Chandra, 2009).

Les espèces de *Stylosanthes*, notamment *S. hamata*, *S. scabra* et *S. guianensis*, contribuent dans une large mesure à l'alimentation de nombreuses espèces animales (Ogunbode et Akinlade, 2012; Chandra, 2009; Osafo et al., 2008; Bamikole et Babayemi, 2004). Elles sont souvent utilisées comme suppléments alimentaires pour les ruminants domestiques, du fait de leur bonne teneur en protéines brutes (PB), 150 à 300 g/kg MS, supérieure au seuil de 8% en dessous duquel l'ingestibilité est inhibée

(Ogunbode et Akinlade, 2012). La qualité du fourrage varie, cependant, avec le stade de développement de la plante. Des teneurs en PB plus élevées et des teneurs en parois totales (Neutral Detergent Fiber, NDF) faibles sont obtenues en période de croissance. Une fauche de *S. hamata*, après 45 jours de croissance, permet d'obtenir du fourrage à 18% PB et 52% NDF (Lukkananukool et al., 2013). En conséquence, la digestibilité du fourrage qui dépend étroitement de la teneur en NDF varie avec l'âge et la morphologie (rapport feuille/tige, notamment) de la plante. Comme pour la majorité des fourrages tropicaux, la digestibilité des feuilles et des tiges des espèces de *Stylosanthes* diminue considérablement avec l'âge de la plante, passant de 71,6 à 60,3% et de 51,9 à 36,7%, respectivement, entre les stades de végétation jeunes et âgés (McIvor, 1979). D'après cet auteur, entre ces stades végétatifs, le rapport feuille/tige d'un couvert de *Stylosanthes* passe de 80/20 à 25/75 et contribue à réduire davantage de la digestibilité de la plante entière. La composition de la ration des animaux au pâturage est affectée par ce rapport; le ratio feuille/tige de l'ingéré du bovin varie de 2/1 à 1/2, de la saison humide à la saison sèche (Gardener et al., 1988). L'appétibilité du fourrage varie selon l'espèce de *Stylosanthes*. *S. hamata* est très appréciée par les animaux, plus que toutes les autres espèces de *Stylosanthes* (Chandra, 2009), surtout au moment de la floraison-fructification (Coulibaly, 1996). Cet avantage de *S. hamata* incite à une stratégie d'alimentation à l'auge qui consiste à apporter un mélange de fourrages d'une légumineuse et d'une graminée (Bamikole et Babayemi, 2004). La légumineuse fourragère améliore considérablement l'ingestion de matière sèche et la digestibilité de la graminée lorsqu'elle supplémente une ration de base ingérée sur pâturages naturels en fin de cycle ou de pailles de céréales cultivées (Osafu et al., 2008; Bamikole et Babayemi, 2004). Les tests chez le mouton de rations à base de graminées pauvres supplémentées par *S. hamata*, *S. guianensis* et *S. scabra*, dans les proportions 70/30, ont montré une importante amélioration de l'ingestion et de la digestibilité de la matière sèche et des protéines (Ogunbode et Akinlade, 2012). Chez la brebis allaitante, l'utilisation de *S. hamata* comme supplément alimentaire de la ration de base améliore considérablement la croissance journalière des agneaux et leur poids au sevrage, sans compromettre la croissance pondérale de la brebis (Osafu et al., 2008). La production laitière est rehaussée de 35%, chez la vache nourrie avec du fourrage de *S. hamata*, comparée à une alimentation sur pâturages naturels tropicaux (Asongwed-Awa et Njaya, 2002). Ces auteurs soulignent, par ailleurs, une variabilité plus grande des performances de production observées entre les animaux recevant du fourrage de *S. hamata* pouvant guider les stratégies d'amélioration de cheptel par sélection massale.

Dans les systèmes agropastoraux, l'adoption d'un paquet de technologies qui intègre la culture du *Stylosanthes*, la conservation du fourrage et l'alimentation des animaux d'élevage est souvent nécessaire pour exploiter tout le potentiel de la légumineuse. Lukkananukool et al. (2013) ont montré que la qualité du fourrage frais de *S. hamata* se conserve par l'ensilage mais qu'il semble nécessaire d'ajouter de la mélasse pour s'assurer de la qualité du produit. Ils ont en effet obtenu, à partir du fourrage de *S. hamata* cv Verano fauché après 45 jours de croissance, un ensilage caractérisé par une teneur minimale de MS de 31,26% et un pH relativement élevé de 5,06. En effet, un ensilage de qualité se caractérise par son pH bas, voisin de 4, sa faible teneur en azote ammoniacal, moins de 9% de l'azote total, et sa faible concentration en acide butyrique, moins de 5,5 g.kg⁻¹ MS (Phiri et al., 2007). Ces caractéristiques peuvent être obtenues plus facilement par l'utilisation d'additifs, dont la mélasse. Par sa composition en hydrate de carbone soluble, notamment le saccharose, la mélasse améliore la fermentation en facilitant la production d'acide lactique par les bactéries. Conservé sous forme de foin, le stockage fourrage de *S. hamata* permet de différer son utilisation et de relever le niveau d'ingestion et la qualité de l'ingéré lorsque la valeur fourragère des ressources naturelles est médiocre (Ogunbode & Akinlade, 2012; Osafu et al., 2008)

I. 3. Voies possibles d'intégration de *S. hamata* dans les systèmes de production agricole mixtes

En région sahélo-soudanienne, *S. hamata* peut être intégrée dans différents systèmes de production : en association avec une céréale, installée ou non en semis direct dans un paillis constitué à partir de son couvert, mais aussi dans des systèmes agroforestiers et sylvopastoraux où elle assure la couverture permanente du sol (Ogunbode et Akinlade, 2012; Saito et al., 2010; Chandra, 2009; Asongwed-Awa et Njaya, 2002). L'installation de *S. hamata*, dans ces systèmes, se fait par semis à la volée ou en poquets, à faible profondeur. Breman et al. (1998) rapportent qu'une profondeur de 2 cm est trop

grande pour assurer une germination efficace de *S. hamata*. Selon le type de sol, la levée de *S. hamata* s'observe entre le 4^{ème} jour et trois semaines après semis. Une germination plus rapide et de meilleurs taux de levée sont obtenus sur sols sablo-limoneux (Coulibaly, 1996). En outre, la scarification des semences permet d'améliorer la vitesse et le taux de germination. Dans les systèmes d'association de cultures céréale-légumineuse en région soudanienne, *S. hamata* est semé une à plusieurs semaines après la céréale (Saito et al., 2010; Asongwed-Awa et Njoya, 2002), pour limiter la concurrence de la légumineuse sur la culture associée. Asongwed-Awa et Njoya (2002) ont, toutefois, montré que l'association *S. hamata*-céréale retarde la floraison du *Stylosanthes* d'une semaine et la production de semences, de deux semaines. Ces auteurs relatent également une diminution de la production de matière sèche, de 41,70%, et de semences, de 22,45%, par rapport à la culture pure de *Stylosanthes*.

Dans les régions à pluviométrie satisfaisante (> 800 mm.an⁻¹), l'utilisation de *Stylosanthes* comme culture de couverture dans les systèmes agroforestiers et sylvopastoral est la plus répandue (Chandra, 2009). La gestion de la biomasse de *Stylosanthes* implique des fauches tous les 2 à 3 mois ou une exploitation *in situ* par le bétail (Onyeonagu et Asiegbu, 2013; Ogunbode et Akinlade, 2012). La fauche ou le pâturage est amorcé la seconde année; une fauche (ou un pâturage) précoce compromet la réussite de l'installation de la culture (Asongwed-Awa et Njoya, 2002). Dans les écosystèmes pâturés, *S. hamata* a un meilleur comportement que *S. scabra* (Chandra, 2009). Le fauchage de la biomasse de *S. hamata* après 90 jours de développement donne la meilleure qualité de fourrage (Sungthongwises et al., 2011).

I. 4. Contraintes au développement des systèmes intégrant *S. hamata*

Les obstacles au développement de la culture des espèces de *Stylosanthes*, en Afrique de l'ouest, sont nombreux et variés. Les contraintes majeures sont d'ordre phytosanitaire, technique et socio-économique.

L'antracnose, causée par *Colletotrichum gloeosporioides*, est une des limitations majeures à l'établissement et l'utilisation de certaines espèces de *Stylosanthes* dans les systèmes de culture et les pâturages. *S. hamata*, notamment cv. Verano et cv. Amiga, montre généralement une solide résistance à l'antracnose (Cameron et al., 1997). Toutefois, elle est sensible au biotype A de *C. gloeosporioides* qui lui cause des dégâts faibles à modérés (Chakraborty, 2004; Munaut et al., 1998; Sukumar et al., 1996), surtout lorsque les conditions environnementales sont favorables au développement de l'antracnose (Cameron et al., 1997). Les dégâts occasionnés par l'antracnose chez *S. hamata* concernent principalement la production de semences (Cameron et al., 1997; Chakraborty, 2004), mais aussi la production en quantité et en qualité du fourrage (Kelemu et al., 2004). Chakraborty, (2004) rapporte un rapide développement de la maladie sur toutes les parties aériennes de la plante, avec des conséquences néfastes sur l'établissement et la production du *Stylosanthes*, lorsque le pathogène est disséminé à travers les semences. Les études visant à isoler et à identifier des souches de *C. gloeosporioides* sur *S. hamata* cultivée en régions soudano-sahéliennes sont peu diversifiées (Chakraborty, 2004). Lors d'essais réalisés en 1987 en Côte d'Ivoire, Munaut et al. (1998) ont isolé le biotype A de *C. gloeosporioides* sur *S. hamata*. Cette contrainte phytosanitaire est accrue par la variabilité de la virulence des souches de *C. gloeosporioides* selon les régions géographiques et l'aptitude du champignon à développer rapidement une virulence nouvelle contre les espèces de *Stylosanthes* résistantes (Chakraborty, 2004). L'amélioration de la biodiversité au champ, avec des espèces végétales résistantes à un ou plusieurs biotypes de *C. gloeosporioides*, est potentiellement un moyen de lutte à court terme, surtout pour les espèces annuelles de *Stylosanthes* (Cameron et al., 1997). Elle permet de limiter la propagation de l'épidémie d'antracnose (Cameron et al., 1997), sans pour autant améliorer la résistance de la plante (Kelemu et al., 2004).

La contrainte technique majeure porte sur l'établissement de la culture et la production de semences de *Stylosanthes* à un coût raisonnable (Asongwed-Awa et Njoya, 2002). L'établissement du *Stylosanthes* est lent et une faible quantité de biomasse est produite en première année. La faible croissance de *S. hamata* et sa capacité de couverture du sol très limitée, en année d'installation de la culture, sont à lier avec le décalage de la nodulation qui est amorcée 60 jours après semis (Sungthongwises et al., 2011). En Afrique de l'Ouest, les pratiques de production de semences fourragères sont assez restreintes, limitées à quelques fermes semencières dont beaucoup ne perdurent

pas du fait d'un marché trop étroit et irrégulier (Toutain et al., 2009). Le décalage de la floraison et de la maturation des graines de *S. hamata*, par rapport à la saison pluvieuse de la région, permet pourtant la production de semences même pour les associations culturales légumineuse-céréale (Asongwed-Awa et Njoya, 2002). Le coût de production du kilogramme de graines dépend de la productivité du sol, de la date de semis et de la variété cultivée (Bulakali et al., 2013). La technique de récupération de graines de *Stylosanthes* par tamisage du sol, développée par Bulakali et al. (2013) dans des sols à texture sableuse, permet une bonne production de semences à faible coût.

Le coût de production des semences doit être, en effet, compatible avec la rentabilité des exploitations familiales d'Afrique de l'Ouest caractérisées par la faiblesse de leurs capacités d'investissement. La concurrence du niébé (*Vigna unguiculata*) qui est traditionnellement bien intégré dans les systèmes de cultures et qui offre une diversité de produits utilisables en alimentation humaine ou animale est également un obstacle à l'introduction de la culture de *S. hamata* dans la région (Toutain et al., 1992). En outre, la diffusion d'innovations relatives à la culture de *S. hamata* requiert un effort consistant de formation et d'apprentissage des producteurs. A ces contraintes socioéconomiques s'ajoute le mode de conduite des animaux domestiques. En effet, même dans les zones où les surfaces cultivées occupent une part importante du finage villageois, la divagation des animaux est la règle. Le contrôle du bétail divaguant en dehors des périodes de culture implique des mesures de protection des soles fourragères.

Conclusion

A l'issue de cette revue bibliographique nous pouvons conclure que *S. hamata* est particulièrement adaptée aux contraintes naturelles rencontrées dans les régions sahélo-soudaniennes d'Afrique de l'Ouest, où elle offre des possibilités d'intensification intéressantes. Elle peut être intégrée à plusieurs systèmes de culture céréalières, en association ou en SCV, où elle permet d'améliorer la production de la céréale, la production de biomasse fourragère de bonne qualité, la fertilité du sol notamment sa teneur en matière organique et en azote. L'utilisation pratique de la fixation biologique d'azote est d'une importance notoire surtout pour les petites exploitations familiales qui ne disposent pas de ressources suffisantes pour fertiliser convenablement leurs champs. En outre, l'intérêt de *S. hamata* devrait inciter ces exploitations à développer des systèmes d'élevage nouveaux. Il est difficile d'envisager une amélioration des performances de l'élevage en Afrique tropicale sans une mutation des systèmes d'élevage, notamment pour l'alimentation des animaux. Testées dans plusieurs systèmes d'affouragement, les réserves fourragères, de foin ou d'ensilage de *S. hamata*, permettent d'améliorer considérablement les performances zootechniques des ruminants domestiques.

Chapitre II

Analyses prospectives des possibilités d'amélioration durable des performances des exploitations agricoles de l'ouest du Bassin Arachidier du Sénégal : cas des producteurs de *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.)

Chapitre II

Prospective analyzes of the potential for sustainable improvement of agricultural performance in the western Peanut Basin of Senegal: Case of *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.) producers

Le deuxième chapitre a été adapté d'une publication dans *Tropicultura* [*Tropicultura* (2018) 36, 4: 658-672]. Il porte sur la caractérisation des exploitations familiales et des systèmes de production du bassin arachidier du Sénégal, en vue de dégager les axes d'amélioration possibles. Il présente les résultats de la typologie structurelle et fonctionnelle des exploitations familiales, sur la base de leurs ressources productives, de leur dotation en équipement et de leur stratégie de production. Elle a permis de regrouper les EAF en différents groupes plus ou moins homogènes afin de dégager des solutions adaptées à chaque classe. L'étude fait également une analyse des facteurs de production qui montre une évolution des éléments fondamentaux qui déterminent les capacités de l'exploitation. Elle constitue une étape préalable indispensable dans une démarche de recherche action en partenariat.

Résumé

Une enquête a été menée auprès de 65 exploitations agricoles familiales (EAF) cultivant le *Jatropha* dans le Sud-Ouest du bassin arachidier sénégalais afin de comprendre leur fonctionnement et identifier des innovations agricoles permettant d'améliorer durablement leurs performances. Les résultats obtenus ont fait l'objet d'une analyse en composantes principales suivie d'une classification ascendante hiérarchisée. Ces analyses ont permis de classer les EAF en quatre grands types. L'équipement agricole et le type d'élevage sont les principaux facteurs discriminant ceux-ci. Les exploitations agricoles de type I représentent 6,1% de l'effectif total. Elles disposent en moyenne de 27,5 ha, de l'ensemble du matériel agricole de traction animale et d'un cheptel important et diversifié. Le type I se distingue du type IV (10,8 %) principalement par son cheptel plus important. Le type II (30,8%) est essentiellement constitué d'agriculteurs qui disposent en moyenne de 5,3 ha, sans aucun animal de trait ni de matériel agricole de traction animale. Les exploitations agricoles de ce type sont souvent dans une situation très précaire et leur survie est menacée. Le type III (52,3%) dispose en moyenne de 9,4 ha et d'un cheptel composé d'ânes et de petits ruminants. Deux grands types de systèmes de culture basés sur la rotation arachide/mil et la monoculture du mil avec un faible apport de fumure organique se retrouvent chez l'ensemble des exploitations enquêtées. Celles-ci pratiquent en général un élevage extensif peu performant. Les synergies entre les productions animales et végétales sont peu développées au sein des exploitations. Les perspectives d'amélioration des performances des grands types d'exploitation identifiés sont discutées.

Mots clés: Enquêtes, système de production, synergies, agriculture, élevage.

Abstract

A survey was conducted with 65 family farms (FFs) cultivating *Jatropha* in the southwest of the Senegalese groundnut basin in order to understand their functioning and to identify sustainable agricultural innovations to improve their performances. The results obtained were the subject of a principal component analysis followed by a hierarchical ascendant classification. These analyses classified the FFs into four main types. Agricultural equipment and the type of livestock are the main factors discriminating them. Type I farms account for 6.1% of the total number. They own an average area of 27.5 ha, all agricultural traction implements and a large and diversified livestock. Type I is distinguished from type IV (10.8%) mainly by its larger livestock. Type II (30.8%) consists mainly of farmers who own an average area of 5.3 ha, without any draft animals or agricultural traction equipment. Farms of this type are often in a very precarious situation and their survival is threatened. Type III farms (52.3%) own an average area of 9.4 ha and a herd of donkeys and small ruminants. Two major types of cropping systems based on peanut / millet rotation and millet monoculture with low intake of organic manure are found in all surveyed farms. These are generally characterized by an extensive and low performing livestock system. Synergies between livestock and plant productions are poorly developed within farms. The prospects for improving the performances of the main types of FF identified are discussed.

Key words: survey, farming systems, synergies, agriculture, livestock

Introduction

En Afrique de l'ouest, l'agriculture concerne 55 à 86% de la population suivant les pays (Nacro et al., 2010). Elle est pratiquée généralement sans recours à l'irrigation, par des exploitations familiales sur des superficies modestes, principalement pour assurer leur subsistance. Ses performances en termes de rendement sont généralement faibles (Tittonell et al., 2010) et tendent plutôt à diminuer dans les pays de la région (Pretty et al., 2011; Aune et Bationo, 2008). Dans le bassin arachidier du Sénégal, les rendements des principales cultures ont tendance à stagner, voire à baisser depuis plusieurs décennies (Aune et Bationo, 2008). Ce qui entraîne des déficits céréaliers fréquents en milieu rural (Piroux, 2000; Dièye et Guèye, 1998). Ces baisses de performances sont principalement liées à la faible fertilité des sols (Van der Linden, 2011) et à la diminution et à l'irrégularité de la pluviométrie (Aune et Bationo, 2008; Buldgen et al., 1995). Toutefois, l'importance de ces facteurs, tout comme leurs effets sur les productions, varient suivant les agro-écosystèmes et, dans une même zone, selon les exploitations agricoles (Tittonell et al., 2005).

La diffusion d'innovations agroécologiques qui tiennent compte des contraintes et des objectifs des exploitations agricoles constitue une des voies à privilégier pour améliorer durablement les systèmes de production agricole (Djamen Nana et al., 2015; Corbeels et al., 2014; Nacro et al., 2010; Tittonell et al., 2010; Bidogeza et al., 2007; Tittonell et al., 2005). L'adoption d'une innovation par une exploitation agricole dépend des contextes naturel et socioéconomique dans lesquels elle se trouve, de la nature et de l'importance de ses moyens de production ainsi que de sa logique de fonctionnement (Jouve, 1986) qui dépend elle-même en grande partie des connaissances et des savoir-faire des agriculteurs (Dugué & Olina Bassala, 2015; Tittonell et al., 2005). L'établissement d'une typologie des exploitations existant dans une région constitue une étape essentielle dans le processus de diffusion d'innovations agricoles (Jouve, 1986). Elle permet de classer les exploitations en un nombre limité de catégories relativement homogènes et contrastées dont les différences sont telles que les interventions destinées aux exploitations agricoles familiales (EAF) d'un même type puissent être similaires entre elles et différentes de celles conçues pour les autres types (Hauswirth et al., 2015; Tittonell et al., 2010; Tittonell et al., 2005).

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'un travail visant à distinguer les principaux types d'EAF existant parmi les membres de la Fédération des Producteurs de Tabanani (*Jatropha curcas* L.) du département de Foundiougne (FPTF). Ceci dans le but d'identifier, dans une étape ultérieure, les innovations agro-écologiques à proposer pour améliorer durablement le fonctionnement de chaque grand type d'exploitation mis en évidence. Le choix des producteurs de la FPTF tient à son niveau d'organisation et de structuration favorable à un diagnostic approfondi et à l'aptitude supposée de ses membres à innover. En effet, ceux-ci sont les précurseurs dans la région de l'adoption de la culture du *Jatropha*, dans leur stratégie de développement intégré. De plus, l'engagement des membres dans l'innovation et le développement intégré laisse supposer une participation plus volontariste dans un processus de recherche-action en partenariat et des prédispositions favorables à l'adoption des principes de l'agroécologie.

II. 1. Matériel et méthode

1. 1 Cadre d'étude

Le bassin arachidier du Sénégal (lat. 13°30' et 16°15' nord, long. 14°15' et 17°15' ouest) couvre plus de 60 000 km²; il concentre plus de 40% des superficies cultivées et plus du tiers de la population du pays (Sakho, 2009; Piroux, 2000). Le département de Foundiougne (figure 1), cadre géographique de l'étude, est sous l'influence du climat tropical soudano-sahélien et côtier, caractérisé par deux saisons: une saison sèche (octobre à juin) et une saison pluvieuse (juin-juillet à octobre). La moyenne de précipitations annuelles, de 2000 à 2010, est établie à 732 mm, avec souvent une mauvaise répartition et des séquences sèches en début de saison des pluies. Dans la classification de la FAO, les sols de la zone appartiennent au groupe "luvic acrisol" (Feller et al., 1987), caractérisés par une structure grossière, une faible teneur en matière organique, une capacité d'échange cationique (CEC) faible, une érosion très marquée et une aptitude culturale limitée. Dix villages répartis selon un axe Nord-Sud (figure 1), correspondant au gradient pluviométrique observé dans la région, ont été identifiés pour réaliser l'étude.

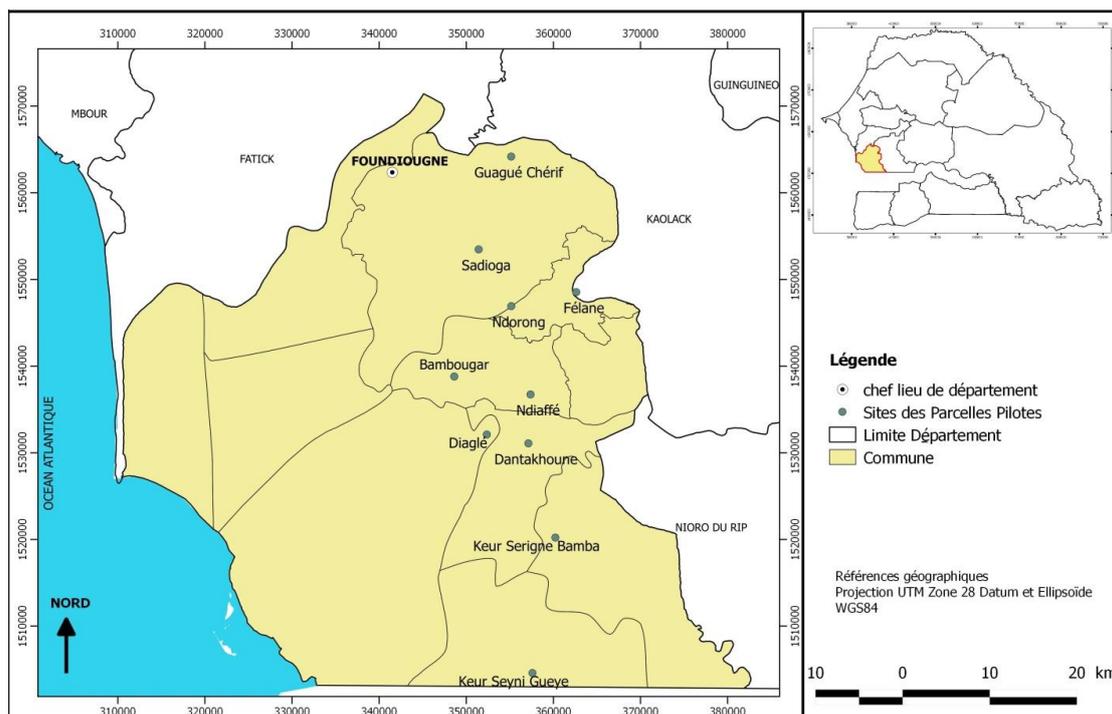


Figure 2 : Situation géographique de la zone d'étude et localisation des villages

1. 2 Collecte des données

L'étude a été menée auprès des membres de la Fédération des Producteurs de Tabanani (*Jatropha curcas* L.) de Foundiougne (FPTF) qui en comptait six cent en 2012, répartis dans dix villages (figure 1). La collecte des données a été faite à travers des enquêtes, en 2011 et 2012, sur un échantillon de 65 EAF choisi selon la méthode d'échantillonnage aléatoire avec probabilité proportionnelle à la taille (Sossa et al., 2014). Les entretiens avec le chef d'exploitation, ou un membre qu'il désigne, ont été organisés autour d'un questionnaire semi-structuré. Le chef d'exploitation (ou le membre désigné) a été interrogé sur la taille et la composition de l'exploitation, les ressources (terres, équipements, etc.), les spéculations cultivées, les tâches culturales et leur succession, la taille et la composition du cheptel domestique, les pratiques d'élevage, l'utilisation des productions agricoles et/ou d'élevage, les activités non agricoles et leurs contributions au revenu familial.

1. 3 Prétraitement et analyse des données

Le prétraitement des certaines données d'enquêtes a débouché sur la conversion des unités de mesures utilisées par les producteurs (charrettes, baril, bottes, etc.) en unités de mesures universelles. La main d'œuvre familiale des EAF est exprimée en nombre d'actifs agricoles qui sont définis comme des personnes majeures, entre 17 et 55 ans, présentes dans l'exploitation durant toute la période de culture (Stessens, 2002). De ce fait, les enfants et les personnes âgées de plus 55 ans ont été estimés à 0,5 actif. Le temps de travail est ramené à l'homme-jour (H.J) qui correspond au travail d'un actif durant une journée de 6 heures.

Les analyses statistiques ont été faites sur R (R Development Core Team 2015). Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour déterminer le niveau d'influence de chaque facteur sur les caractéristiques des exploitations et les corrélations qui existent entre eux. Une classification ascendante hiérarchisée (CAH) des facteurs de production a permis de faire ressortir les facteurs discriminants majeurs de la typologie. La qualité de la CAH a été évaluée par la détermination des valeurs de probabilités AU ("Approximately Unbiased") et BP ("Bootstrap Probability"), à partir de la procédure de ré-échantillonnage bootstrap (Suzuki et Shimodaira, 2006). Il a été admis que l'échantillonnage corrobore la réalité (au seuil d'erreur 0,05) lorsque la valeur de probabilité AU est

supérieure à 95%. Ce travail a permis de classer les EAF en quatre groupes, sur base de leurs capacités de production.

II. 2. Résultats

2. 1. Typologie des exploitations

2. 1. 1. Les facteurs de production

L'ACP montre que deux composantes expliquent 64% de l'information rassemblée sur les caractéristiques des EAF. La première composante qui explique près de 52% de la variation est déterminée par la possession de houe et de semoir tractés, la présence d'au moins un cheval, la disponibilité en terre et la possession d'au moins une charrette. La deuxième composante (qui explique plus de 12 % de la variation) est déterminée par la présence d'au moins une charrue et par l'effectif du cheptel bovin. L'analyse par grappe, selon la méthode de CAH, classe ces facteurs parmi les quatre premiers niveaux d'importance (figure 3). Ces facteurs de production permettent de différencier les EAF, avec une fiabilité statistique élevée. Les valeurs de probabilité AU, toutes supérieures à 95% au niveau des quatre premières grappes, prédisent une faible part de l'incertitude liée à l'échantillonnage. Le poids de chaque facteur dans la caractérisation des EAF et les corrélations qui existent entre eux sont illustrés sur la figure 4, par la densité de coloration et l'encoignure des vecteurs. Les superficies cultivées sont corrélées avec le niveau d'équipement agricole ($R^2 = 0,70$ à $0,79$) et l'effectif du cheptel équin ($R^2 = 0,64$) des exploitations. La forte corrélation entre l'équipement en houes tractées et le cheptel équin ($R^2 = 0,77$), d'une part, et de ce dernier avec le nombre de semoirs ($R^2 = 0,83$), d'autre part, dénote l'interdépendance de ces facteurs et l'importance du cheval pour la réalisation du semis. Le sarclage des surfaces emblavées se faisant essentiellement à la houe tractée, le niveau d'équipement de celle-ci suit celui du semoir ($R^2 = 0,88$).

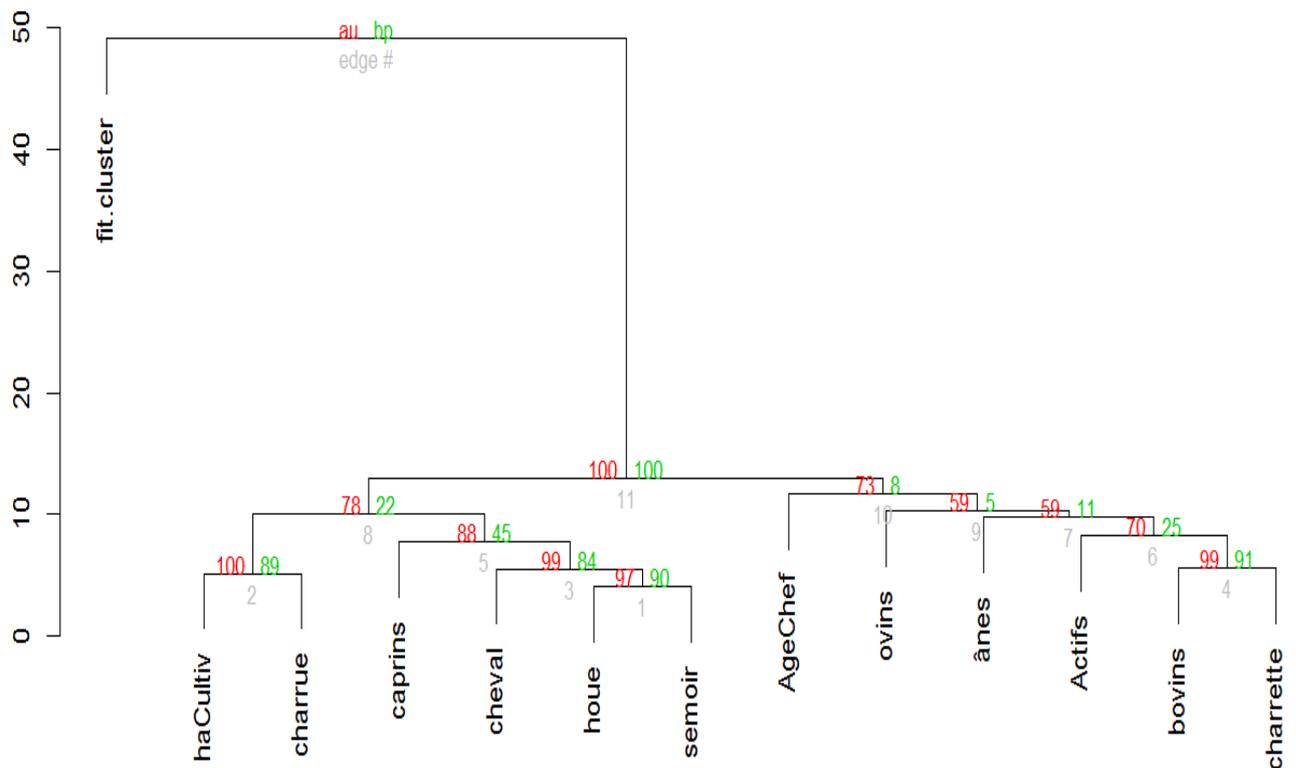


Figure 3 : Classification ascendante hiérarchisée des facteurs de productions des EAF (avec des valeurs de probabilité -AU/BP - à différents niveaux)

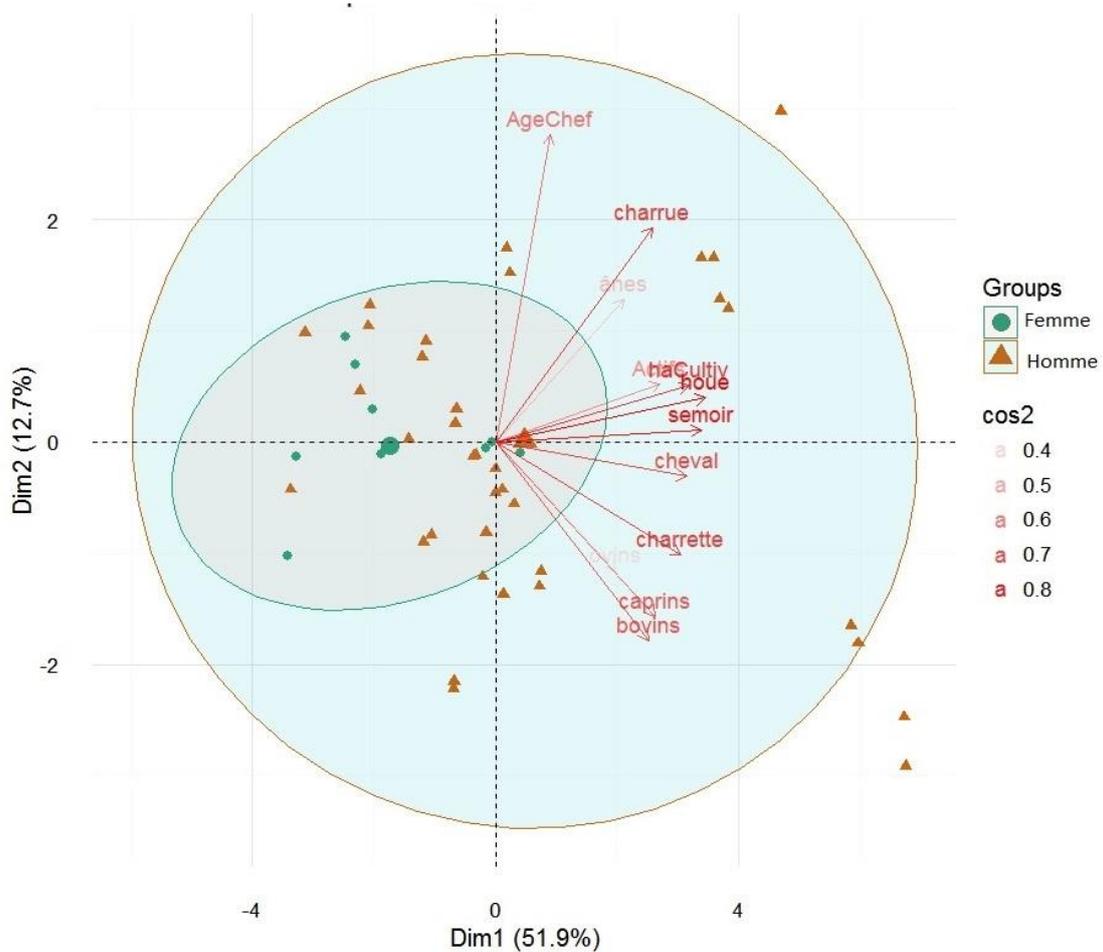


Figure 4 : Représentation graphique de la matrice de données d'enquêtes (variables-exploitations) réalisées sur les EAF du sud-ouest du Bassin arachidier du Sénégal

2. 1. 2. Classification des exploitations

Les EAF des membres de la FPTF sont, en majorité, dirigées par des hommes (79,2%) dont l'âge moyen est de 52 ans; les femmes chefs d'exploitations ont 50 ans en moyenne. En moyenne, les exploitations sont constituées de 6 actifs et disposent de 10,7 ha de terres cultivables. Toutefois, des contrastes très marqués existent entre elles. Les analyses réalisées permettent de distinguer clairement quatre types d'EAF (figure 5).

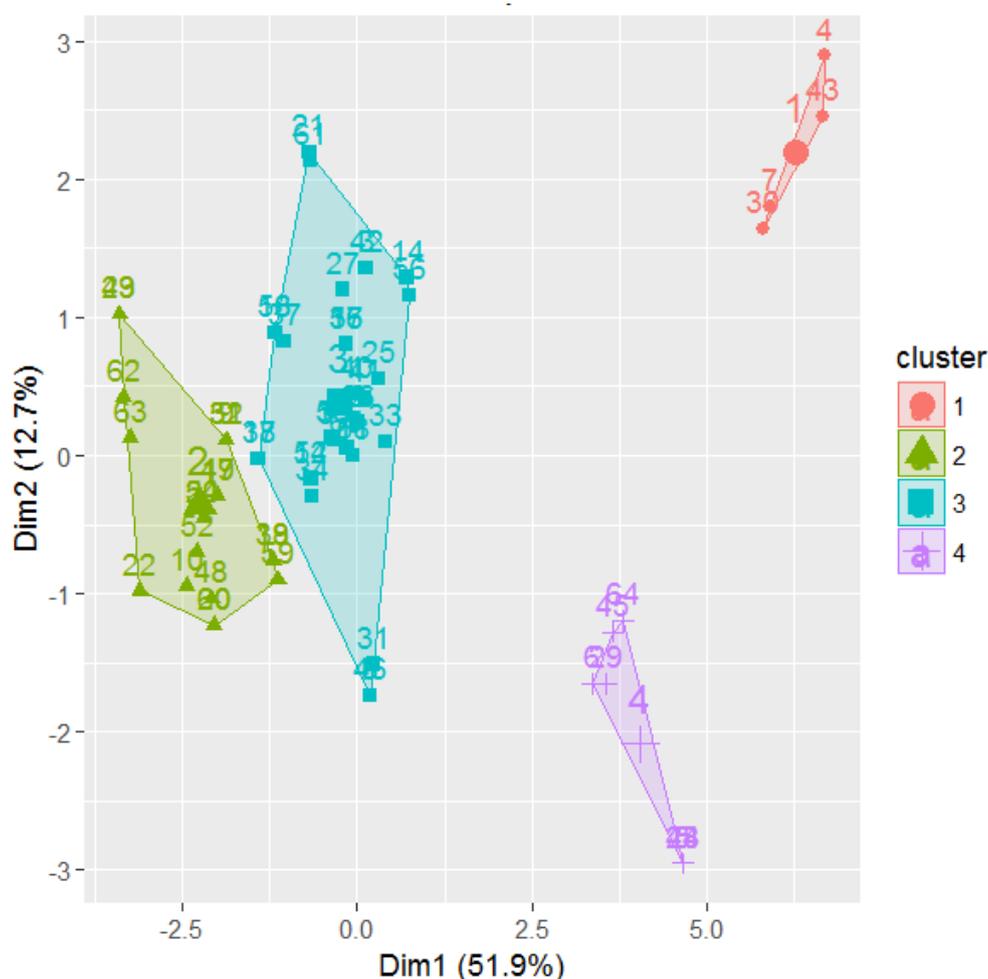


Figure 5 : Classification, en quatre groupes, des EAF du sud du bassin arachidier du Sénégal

Les EAF de type I (6,1%) se caractérisent par leur capacité de production élevée. En effet, elles disposent d'importantes ressources en terres, de toute la gamme d'équipements agricoles utilisés dans la zone et d'un cheptel nombreux et diversifié (tableau 1). Au niveau de ces exploitations, le cheval est très utilisé pour la réalisation des tâches culturales (semis, sarclage) et le transport. L'équipement agricole de ces EAF est lié aux animaux de trait dont elle dispose : la présence de houes tractées, de semoirs et de charrettes mais absence de charrues. Le niveau d'équipement et la disponibilité en main d'œuvre familiale (12,9 actifs par exploitation) permettent à ces exploitations d'emblaver de grandes surfaces. L'élevage des ruminants domestiques est une caractéristique majeure de ces exploitations. Les effectifs moyens de ces animaux s'élevaient à 7,8 unités de bovins, 9,5 unités d'ovins et 19,5 unités de caprins. Toutes les exploitations agricoles de ce type sont dirigées par des hommes qui définissent leur fonctionnement et assure la répartition des tâches.

Le type II (30,8%) regroupe les EAF dotées de faibles capacités de production (tableau 2). Elles sont caractérisées par une disponibilité en terre limitée (5,3 ha par EAF), l'absence de certains équipements (charrue, charrette) et des espèces équine et bovine. La disponibilité en terre est une contrainte majeure pour le tiers d'entre elles (soient 7 EAF sur 65) qui disposent de moins de 4 ha chacune. Leur sous-équipement en matériel agricole de base est très marqué : la moitié de ces exploitations ne dispose d'aucun équipement agricole à traction animale. L'exécution des travaux des champs manuellement se traduit fréquemment par une dizaine de jours de retard dans le déroulement du calendrier cultural. L'élevage est peu pratiqué et concerne essentiellement l'espèce caprine. L'élevage des ovins et des asins n'est pratiqué que par une partie de ces exploitations. La moitié des EAF de type II est dirigée par des femmes.

Le type III (52,3%) est composé d'EAF de taille moyenne. Celles-ci disposent en moyenne de 9,4 ha de terre, de l'ensemble des équipements agricoles (sauf la charrue) et de toutes les espèces d'animaux domestiques (tableau 2). L'essentiel de ces exploitations (82%) possède au moins un animal de trait, généralement un âne. Elles privilégient, pour la plupart (79,4% des EAF de type III, soit 42% de l'ensemble des EAF enquêtées), la culture de l'arachide par rapport à celle du mil. L'élevage de ruminants est orienté vers l'exploitation des caprins qui sont plus prolifiques et accessibles à moindre coût. Ces EAF sont essentiellement (88%) sous l'autorité d'un homme.

Les EAF de type IV (10,8%) sont, à l'image de celles de type I, caractérisées par l'importance de leurs moyens de production agricole et dirigées par des hommes. Elles disposent de grandes surfaces cultivables (23,1 ha), d'une forte main d'œuvre familiale (12,3 actifs), d'un équipement agricole diversifié et de plusieurs espèces d'animaux domestiques (tableau 2). Elles se différencient de celles de type I par leurs pratiques d'élevage et le choix de leurs équipements agricoles. En effet, les EAF de type IV ont des cheptels moins nombreux que celles de type I, d'une part, et elles accordent une importance particulière au taureau et à l'âne, plus endurants que le cheval dans le travail des sols lourds, d'autre part. Dans la gamme de leurs équipements agricoles, la charrue y est plus présente qu'au niveau des EAF de type I.

Par ailleurs, des disparités existent entre les EAF, en fonction des villages. Ceux situés plus au sud et plus éloignés des points d'échange, notamment Keur Seyni Guèye, Keur Serigne Bamba et Dantakhoune, concentrent l'essentiel des EAF de types I et IV. A l'inverse, les exploitations de type II sont généralement situées dans les villages de Diaglè, Bambougar et Félane situés plutôt au centre de la zone d'étude.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des différents types d'EAF produisant du *Jatropha* du sud-ouest du bassin arachidier du Sénégal

Groupes	Proportion (%)	Main d'œuvre et terres			Niveau d'équipement (en nombre)				Composition du troupeau (nombre de têtes)				
		Nombre d'actifs	Superficie totale (ha)	Rapport Sup./Actif	Charrues	Houes	Semoirs	Charrettes	Bovins	Ovins	Caprins	Ânes	Equins
Type I	6,1	12,9 ±5,2	27,5 ±12	3,0 ±2,1	0,5 ±0,5	4,0 ±1,0	3,0 ±0,0	2,5 ±0,5	7,8 ±0,4	9,5 ±2,6	19,5 ±10,5	1,5 ±0,5	2,5 ±0,5
Type II	30,8	3,8 ±1,7	5,3 ±2,4	1,4 ±0,4	0,0	0,6 ±0,5	0,7 ±0,5	0,2 ±0,4	0,2 ±0,6	0,4 ±0,5	1,4 ±1,2	0,5 ±0,5	0,0
Type III	52,3	5,7 ±3,0	9,4 ±3,2	1,9 ±0,6	0,0	1,9 ±0,2	1,3 ±0,4	1,0 ±0,3	1,8 ±1,8	2,2 ±3,0	4,0 ±2,5	1,1 ±0,8	0,3 ±0,6
Type IV	10,8	12,3 ±4,6	23,1 ±6,8	2,5 ±1,6	1,4 ±0,5	3,9 ±1,0	2,4 ±0,5	1,6 ±0,5	3,0 ±2,7	1,9 ±0,6	5,6 ±3,0	2,6 ±0,5	1,4 ±0,5

Tableau 2 : Assolement (en ha) et principales cultures des exploitations productrices de *Jatropha* du sud-ouest du bassin arachidier

Groupes	Emblavure (ha)	Cultures pluviales				Cultures pérennes ou de contre saison				
		Mil	Arachide†	Maïs	Sésame	Anacardiens	Manguiers	Maraîchères	Autres††	
Type I	27,5 ±12	8,5 ±2,3	8 ±1,9	2,5 ±2,0	0,8 ±0,7	6,5 ±0,9	0,7 ±0,5	0,0	0,5 ±0,9	
Type II	5,3 ±2,4	2,1 ±0,4	1,9 ±0,6	0,0	0,0	0,5 ±0,7	0,4 ±0,5	0,4 ±0,2	0,0	
Type III	9,4 ±3,2	3,8 ±1,3	4,1 ±1,1	0,3 ±0,5	0,1 ±0,3	0,7 ±0,5	0,3 ±0,5	0,1 ±0,1	0,0	
Type IV	23,1 ±6,8	7,3 ±1,8	7,1 ±1,6	1,8 ±0,7	1,2 ±0,6	5,1 ±1,1	0,5 ±0,3	0,0	0,1 ±0,3	

†: Arachide associée ou non à *Hibiscus sabdariffa* ("bissap") ou *Vigna unguiculata* ("niébé"); ††: Agrumes, Pastèques

2. 2. Les productions végétales

Les productions végétales sont dominées par les cultures pluviales qui occupent entre 74 et 88% des superficies agricoles (tableau 2). Deux grands types de systèmes de culture dominent : la monoculture du mil (avec apport de fumure organique) et la rotation biennale Mil/Arachide.

Quand il est cultivé en continu dans les champs de case, le mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.], bénéficie généralement de l'apport d'une faible quantité de fumure organique (moins de 1,5 t.ha⁻¹ de matière brute). Son semis est fait à sec, à l'aide d'un semoir tracté, avec des écartements moyens de 90×90 cm. Les semences utilisées sont essentiellement autoproduites (98%) et de cycle moyen à long (95 à 120 jours). L'entretien de la culture nécessite deux à trois sarclages à la houe qui mobilisent une main d'œuvre importante, notamment le premier sarclage qui demande environ le tiers de travail en plus que le deuxième. La rapidité d'exécution du sarclage est souvent une condition pour garantir une bonne production. Les rendements varient entre 600 et 900 kg.ha⁻¹ de mil (grains), selon les villages (tableau 3) et les catégories d'EAF (tableau 4). La culture continue du mil s'observe chez toutes les EAF de types I et IV, ainsi que chez 67,6% des EAF de type III et 10% des EAF de type II.

La rotation Mil/Arachide est généralement pratiquée dans les champs plus éloignés des cases. Ces cultures sont sarclées après celles des champs de cases; en outre, elles ne bénéficient d'aucune fumure organique. Les rendements en mil obtenus varient entre 200 et 600 kg.ha⁻¹, suivant les villages (tableau 3). Les plus faibles rendements (200 kg.ha⁻¹) sont obtenus par les EAF de type II et une partie des EAF de type III (tableau 4) qui ne disposent pas d'équipements agricoles adéquats et/ou de la main d'œuvre nécessaire, pour exécuter le calendrier cultural. Le poids de ces contraintes au niveau des EAF et une conjoncture climatique défavorable (mauvaise répartition des pluies) peuvent contraindre certains agriculteurs de type II à abandonner des champs de mil envahis par les adventices. Lorsque la disponibilité en main d'œuvre est le principal facteur limitant, notamment pour certaines EAF de type III, celles-ci accordent la priorité aux cultures d'arachide [*Arachis hypogea* L.]. Dans ce cas, l'arachide est cultivée seule ou en association avec le "bissap" [*Hibiscus sabdariffa* L.] ou le niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]. Son semis, en lignes continues espacées de 45 à 50 cm, est fait après la première pluie utile et un grattage superficiel du sol. Les semences d'arachide sont souvent autoproduites (57%) ou achetées (43% dont seulement 2% de semences certifiées). L'itinéraire technique appliqué à la culture de l'arachide varie entre les groupes d'EAF: celles de types III intensifient généralement la production en appliquant des densités de semis élevées et environ 25 kg.ha⁻¹ d'engrais minéraux tandis qu'au niveau des autres groupes, surtout les types I et II, l'arachide est associée avec une culture secondaire sans apport d'engrais. Trois sarclages à la houe sont souvent nécessaires, pour assurer le nettoyage des champs. Ils s'accompagnent d'un buttage afin de favoriser l'enfouissement des gousses. Les rendements en gousses sont très variables, suivant les villages (tableau 3), la densité de semis, l'apport d'engrais minéral et de la bonne tenue du champ. Les EAF de type III ayant intensifié leur culture d'arachide réalisent les meilleurs rendements qui varient entre 900 kg.ha⁻¹ et 1250 kg.ha⁻¹ (tableau 4). Les EAF de type II réalisent les plus faibles performances agricoles avec des rendements moyens de 300 kg.ha⁻¹. Les types I et IV réalisent des rendements moyens de 750 kg.ha⁻¹ et 700 kg.ha⁻¹, respectivement.

Tableau 3 : Rendements moyens (en kg.ha⁻¹), par village, des cultures de mil et d'arachide

Villages	Nombre d'EAF	Mil (en monoculture)	Mil (dans la rotation)	Arachide
Bambougar	6	613 ±38	302 ±73	400 ±67
Dantakhouné	14	760 ±44	393 ±86	820 ±148
Diaglè	5	602 ±55	373 ±80	320 ±26
Félane	4	665 ±62	405 ±93	532 ±45
Guagué Chérif	5	643 ±85	402 ±67	560 ±44
Keur Serigne Bamba	5	870 ±33	430 ±15	853 ±166
Keur Seyni Guèye	6	915 ±27	630 ±34	795 ±145
Ndiaffé	9	638 ±67	432 ±53	573 ±82
Ndorong Sérère	5	847 ±53	419 ±65	630 ±80
Sadioga	6	780 ±88	398 ±37	535 ±41
Moyenne		733	418	602

Tableau 4 : Rendements moyens (en kg.ha⁻¹), par type d'exploitation, des cultures de mil et d'arachide

Catégories d'EAF	Nombre d'EAF	Mil (en monoculture)	Mil (dans la rotation)	Arachide
Type I	4	900 ±28	615 ±33	750 ±56
Type II	20	600 ±58	200 ±37	300 ±45
Type III	34	680 ±35	265 ±74	1180 ±98
Type IV	7	930 ±20	620 ±52	700 ±65
Moyenne		696	305	831

Ces cultures mobilisent une main-d'œuvre importante, essentiellement familiale, surtout au niveau des EAF sous-équipées en matériels agricoles (type II). Quand les opérations culturales sont réalisées en traction animale, le nombre moyen d'H.J nécessaires pour cultiver un ha passe de 99 à 50 pour le mil et de 85 à 68 pour l'arachide par rapport au travail totalement manuel. Le sarclage est la tâche qui mobilise le plus de main-d'œuvre: 62% de la main d'œuvre pour la culture du mil et 53% pour celle de l'arachide. L'utilisation d'animaux de trait pour le sarclage réduit donc sensiblement la demande en main-d'œuvre agricole. La traction équine est plus efficace que la traction asine et, permet un gain de temps de 11 à 34%.

D'autres plantes, le maïs, le sésame, l'anacardier et le manguier et les cultures maraîchères, sont cultivées à côté du mil et de l'arachide (tableau 2). Le maïs et le sésame sont essentiellement cultivés par les EAF de types I et IV et, parfois, par celles de type III. Ils occupent moins de 13% des superficies agricoles disponibles au niveau de ces EAF. Le maïs est généralement cultivé dans les champs de case, avec un apport de fumure organique et un entretien régulier. L'arboriculture fruitière, dominée par les plantations d'anacardières et de manguiers, occupent entre 11 et 25,6% des superficies agricoles disponibles au niveau de toutes les EAF à l'exception de celles du type II. Après l'installation de la plantation, les principales activités d'entretien consistent à tailler les arbres, en début d'hivernage et à réaliser un nettoyage autour des pieds, après la saison pluvieuse. L'entrée en production des plantations d'anacardières survient à partir de la 4^{ème} année. Avant celle-ci, des cultures intercalaires de mil ou d'arachide sont installées entre les lignes d'arbres. La production de noix d'anacarde qui s'étale sur 3 mois s'élève entre 200 et 400 kg.ha⁻¹. Les cultures maraîchères sont pratiquées principalement

par les EAF de types II et III où elles occupent jusqu'à 7,4% des superficies agricoles. Le maraichage est plus pratiqué dans les villages de Diaglè et Bambougar, caractérisés par la prédominance des exploitations de type II et leur proximité par rapport au marché de commercialisation.

2. 3. Les productions animales

L'élevage des animaux domestiques est une activité importante des EAF du bassin arachidier: les bovins, les ovins, les caprins, les équins et les asins sont présents dans 45%, 50%, 79%, 29% et 71% des exploitations, respectivement. Le cheptel de ruminants domestiques est constitué essentiellement de femelles (entre 71 et 76%). La pratique de l'élevage bovin est plus marquée au niveau des villages de Dantakhouné, Keur Serigne Bamaba, Keur Seyni Guèye et Ndiaffé où se retrouvent les exploitations de type I et IV. L'élevage des petits ruminants est pratiqué dans l'ensemble des villages, avec une forte dominance des caprins qui représentent, en nombre, plus du double des ovins. Les petits ruminants, notamment les caprins, sont les principaux animaux d'élevage des exploitations de type II. Les animaux de trait, utilisés pour les travaux des champs et le transport, sont plus nombreux dans les villages de Keur Seyni Guèye, Dantakhouné et Ndiaffé. Ce cheptel domestique est conduit suivant trois principales modalités d'élevage.

Le système extensif, avec mobilité du troupeau, est pratiqué essentiellement par les EAF de types I et IV. Il concerne trois-quarts du cheptel bovin qui séjourne, entre mars et septembre, en dehors du terroir villageois. Les animaux sont généralement confiés à un berger moyennant une rémunération monétaire de 200 FCFA par mois et par animal, ou en nature, avec le lait de la traite des vaches. La mobilité est motivée par la taille du cheptel bovin qui ne permet pas le maintien des animaux dans le finage du village toute l'année. L'alimentation de ces animaux devient une contrainte majeure entre mars et juin, d'une part, et l'accès aux rares pâturages est difficile en période de culture, d'autre part.

Le système extensif sédentaire est le mode de conduite dominant chez les petits ruminants; il est également le mode de conduite de près du quart du cheptel bovin (types III et IV). Il concerne principalement des taureaux utilisés en traction animale dans les champs. Selon la période, ces animaux sont fixés au piquet ou pâturent librement, sous la surveillance d'un berger, dans les pâturages naturels ou les champs de mil récoltés. En fin de journée, ils sont parqués dans l'arrière-cour où ils peuvent recevoir un supplément d'aliments fourragers à base de fane d'arachide ou de niébé. La vaine-pâture dans les champs et le parcage nocturne des animaux permettent aux agro-éleveurs de fertiliser les champs avec les déjections produites *in situ* ou collectées durant toute la saison sèche au niveau des parcs nocturnes. En période de culture, les petits ruminants sont conduits par un berger au niveau des pâturages ou fixés au piquet; tandis qu'en saison sèche, ils sont laissés en divagation libre. Leur régime alimentaire est constitué exclusivement de ressources fourragères disponibles sur les parcours naturels et de résidus de culture. L'espèce asine est également conduite suivant les mêmes modalités d'élevage: fixée au piquet en période de culture, elle est laissée en divagation libre en saison sèche.

Le système d'élevage semi-intensif est peu présent dans cette partie du bassin arachidier. En effet, seul 8% des EAF enquêtées, classées dans le groupe III, pratiquent l'embouche ovine de finition. Le cheptel équin bénéficie de la même considération dans toutes les exploitations (types I, III et IV). Ces animaux sont maintenus dans l'arrière-cour des ménages où ils reçoivent une alimentation à base de fane d'arachide et/ou de niébé. Cette ration peut être complémentée par des céréales (mil) ou des concentrés du commerce, notamment en période de fortes activités culturelles. Le maintien en stabulation des animaux s'accompagne généralement d'une production importante de déjections utilisées pour fumer les champs de mil.

Selon l'espèce animale et la modalité de conduite d'élevage, le suivi vétérinaire peut être limité à la vaccination et au déparasitage ou comporter en outre des soins. Les bovins sont vaccinés généralement contre la péripneumonie contagieuse, le charbon symptomatique et la pasteurellose. Chez les équins, la vaccination contre le tétanos et la peste équine qui sont des maladies fréquentes dans la zone n'est pas systématique; elle est conditionnée par les niveaux de risques de contagion au sein de l'espèce. Les soins vétérinaires appliqués à l'espèce équine portent généralement sur les blessures au garrot ou aux sabots. Le déparasitage, en début et en fin de saison pluvieuse, et les traitements anti diarrhéiques sont les principales interventions chez les petits ruminants.

Les performances zootechniques de ces systèmes d'élevage sont faibles, surtout pour le cheptel bovin. En effet, la reproduction de ce cheptel est lente, avec un taux de fécondité ne dépassant pas 50%, soit en moyenne une mise-bas par vache tous les 2 à 3 ans. La production de lait est faible: les

pics de production ne dépassant guère 2 litres par jour et par vache et cette période de pic production ne s'étale pas sur plus de deux mois.

II. 3. Discussion

3. 1. Typologie des exploitations

Les travaux antérieurs visant à caractériser les exploitations agricoles du bassin arachidier classent généralement celles-ci en trois grandes catégories, en fonction de leur surface et de leur nombre d'actifs (Coly et al., 2013; Gaye, 1998). En suivant cette logique, on peut considérer que les types I et IV correspondent aux exploitations de grande taille des classements antérieurs. La principale différence par rapport à ceux-ci porte sur la proportion de chaque catégorie. En effet, les EAF dont la survie est menacée (type II) et qui ne disposent d'aucun équipement de culture attelée représentaient 3%, en 1985, contre 5% en 1992 (Gaye, 1998). Cette proportion s'élève à 12,5% dans notre enquête. Deux facteurs pourraient expliquer, au moins partiellement, cette tendance à l'augmentation des EAF de type II et de la proportion de celles qui se trouvent en situation de précarité aigue: la dégradation généralisée des capacités de production amorcée vers les années 1980 et le régime foncier coutumier qui favorise le morcellement des terres au fil du temps. Une autre explication serait la plus grande propension qu'aurait cette catégorie d'EAF à adopter la culture du *Jatropha* pour s'assurer des revenus complémentaires. Leur faible capacité de production se répercute inéluctablement sur la satisfaction de leurs besoins vitaux. Plusieurs études antérieures rapportent des déficits céréaliers fréquents dont sont d'abord victimes les exploitations les moins bien nanties du bassin arachidier (Piroux, 2000; Dièye et Guèye, 1998). Selon une étude réalisée par Demande (2011), sur les performances économiques des exploitations dans le village de Dantakhoune, le revenu agricole des EAF ayant les mêmes caractéristiques que celles du type II se situe en dessous du seuil de survie. Celles-ci doivent chercher d'autres sources de revenus que ceux générés par leurs activités agricoles pour couvrir leurs besoins vitaux. Pour les EAF des types I, III et IV qui peuvent travailler en culture attelée, la CAH des facteurs de production tend à montrer que l'abondance de la main d'œuvre familiale n'est pas aussi déterminante dans leur fonctionnement que chez les exploitations agricoles analysées trois décennies plus tôt (Jouve, 1986). La terre et l'équipement agricole à traction animale déterminent leur capacité de production. Cette évolution pourrait être liée à la diminution de la surface par actif constatée dans la région (Goussard et Labrousse, 2008). Le type d'animaux de trait est caractéristique de la situation socio-économique des EAF. Celles de type I, qui ont une importante activité pastorale, utilisent davantage la traction équine alors que celles de type IV, qui disposent d'effectifs animaux un peu moins élevés, privilégient la traction bovine. Les EAF de type III développent l'élevage de petits ruminants, notamment les caprins, et utilisent la force de traction asine. L'effectif des petits ruminants est globalement supérieur à celui observé par Piroux (2000) au milieu des années 1990 pour toutes les catégories d'exploitation.

3. 2. Les systèmes de production

Les niveaux d'association entre les cultures et l'élevage sont très variables, en fonction du type d'EAF.

Les systèmes de production exclusivement (ou presque) agricole se rencontrent au niveau des petites exploitations (types II). L'absence d'animaux au niveau de ces exploitations et la faiblesse de leur capacité d'investissement ne permettent aucune forme de fertilisation (organique ou minérale). Par ailleurs, le caractère manuel de leur agriculture se traduit par un étalement de leur calendrier agricole, avec des retards considérables dans la réalisation des sarclages, surtout en année de pluviométrie erratique (Piroux et al., 1997). Ainsi, les rendements agricoles obtenus par ces EAF sont nettement plus faibles et leurs productions ne permettent pas de couvrir leurs besoins alimentaires. Ces EAF pratiquent les cultures maraichères, en saison sèche, pour diversifier et accroître leurs revenus agricoles.

Les systèmes de production agropastoraux sont basés sur l'élevage des équins, des bovins de trait et des asins. Ils se rencontrent au niveau des exploitations de type I, III et IV. Au niveau de ces exploitations, les synergies développées entre les cultures et l'élevage portent principalement sur l'utilisation de la force animale dans les travaux des champs et, dans une moindre mesure, l'utilisation des déjections animales pour la fumure des champs de mil et de maïs et la valorisation des fanes de légumineuses ou d'autres résidus de culture (vaine pâture). L'utilisation de la traction équine, essentiellement par les EAF de type I, permet une exécution plus rapide du semis et des sarclages que

la traction asine, dominant au niveau des exploitations de type III. L'usage des bœufs de traits, pour le travail du sol à la charrue est spécifique aux EAF de type IV. L'élevage des bovins, orienté vers un objectif de reproduction, est au centre des systèmes d'élevage des ruminants domestiques bien qu'il ne soit pas bien intégré aux activités de production agricole à l'échelle de l'exploitation. Le cheptel bovin des EAF de type I est conduit en dehors du village en période de culture. Ainsi, la présence des bovins de traits dans les EAF améliore davantage la disponibilité du fumier. Les doses de fumure organique appliquées par les EAF de type IV sont généralement supérieures à celles de type I. Toutefois, elles restent faibles et inférieures aux doses de fumure organique recommandées en Afrique subsaharienne (Blanchard et al., 2014; Fernandes et al., 2000; Ganry et Badiane, 1998). L'intensification des cultures, même modérée, à travers l'application de fumure organique sur le mil ou la fertilisation minérale de l'arachide permettent d'augmenter leurs performances agricoles. La majorité des EAF de type III ont opté pour une intensification modérée de la culture de l'arachide, à travers l'application de densités de semis élevées et de fertilisation minérale. Ces EAF agropastorales adaptent leurs investissements, en intrants et en main d'œuvre, en fonction de leur situation socio-économique et de l'importance de la culture pour leur subsistance. Elles correspondent aux EAF aux moyens de subsistance intermédiaires décrites par Demande (2011) dans le village de Dantakhouné qui grâce à ce type d'intensification étaient globalement plus performantes en termes de rémunération de leur main d'œuvre que les exploitations de plus grande taille.

3. 3. Perspectives d'évolution

Les faibles performances observées sont liées en grande partie à la faible fertilité des sols (Van der Linden, 2011) nécessitant l'adoption de modes de production basés sur de meilleures synergies entre productions animales et productions végétales (Lhoste, 2004; Landais et Lhoste, 1993). L'intégration entre les cultures et l'élevage constituant une voie intéressante d'amélioration pour tous les types d'exploitation identifiés, nous concentrerons la suite de la discussion sur cet aspect.

Différentes technologies novatrices peuvent être développées, compte tenu de la variabilité des caractéristiques socio-économiques des EAF et des conditions locales (Bidogezza et al., 2007). Les EAF de type I et IV pourraient envisager l'amélioration de la disponibilité du fourrage au niveau de l'exploitation. L'association d'une légumineuse fourragère (ou mixte) avec le mil ou dans les plantations d'arbres fruitiers, d'anacardier notamment, permettrait de sécuriser le système affouragement des animaux. Ce type d'innovation permettrait aux exploitations de type I de maintenir, dans l'unité de production, un effectif d'animaux plus important, pour une durée plus longue. L'objectif de reproduction des cheptels devrait favoriser l'intensification du système d'affouragement des vaches gestantes ou allaitantes, pour accroître les performances zootechniques de reproduction et celles des veaux au sevrage. Une plus grande disponibilité du fourrage devrait se traduire par un accroissement de la charge animale au niveau des EAF. Celle-ci, très faible à raison de 0,1 à 0,4 UBT par hectare cultivé, devrait être amélioré et tendre à 1,5 UBT tel que modélisé par Djamen Nana et al. (2015), pour un fonctionnement optimisé des exploitations agropastorales d'Afrique subsaharienne. L'intensification des systèmes d'élevage s'accompagne d'une production importante de déjections animales permettant de fertiliser les champs. L'apport de 3 à 5 t.ha⁻¹ de fumure organique recommandé en Afrique soudano-sahélienne (Blanchard et al., 2014; Ganry et Badiane, 1998) devrait être assuré à travers le système d'élevage intensif qui permet la production de 5 tonnes de fumier brut par UBT et par an (Landais et Lhoste, 1993).

Les EAF de type II devraient s'orienter vers l'élevage caprin, très prolifique, opportuniste du point de vue alimentaire et à faible coût d'acquisition, et les systèmes de culture qui produisent à la fois des récoltes pour les agriculteurs et du fourrage pour les animaux. Parmi ceux-ci, l'association d'une culture de couverture avec la culture principale pourrait apporter une solution temporaire dans la gestion des espèces adventices (Onyeonagu & Asiegbu, 2013; Odunze, 2002). En effet, le sous-équipement en matériel agricole constitue la contrainte majeure pour ces exploitations, avec pour conséquence des difficultés d'exécution des sarclages et une infestation des champs par les adventices. Par ailleurs, la faiblesse des effectifs d'animaux de ces exploitations ne permet pas de soutenir les pratiques de fumure organique.

Les exploitations de type III gagneraient à diversifier leurs activités à travers l'embouche bovine de finition. La pratique d'embouche offre plusieurs avantages pour ces exploitations: (i) l'optimisation de l'utilisation de la main d'œuvre familiale en période d'interculture, (ii) une meilleure valorisation de la fane d'arachide, (iii) une diversification et une augmentation des revenus et (iv) une production de déjections animales pour fumer les champs. Une meilleure efficacité d'utilisation de l'engrais minéral appliqué à la culture de l'arachide et des rendements plus élevés peuvent être obtenus en combinant les fertilisations minérale et organique (Koulibaly et al., 2015; Ganry et Badiane, 1998; Groot et al., 1998). En outre, la pratique de la fumure organique permet une gestion plus durable des sols.

Conclusion

Cette étude montre que les facteurs de production, notamment la terre cultivable, la taille et la composition des troupeaux, et le niveau d'équipement en matériels agricoles de traction animale, sont les principaux critères de différenciation des EAF produisant du *Jatropha* dans le sud du bassin arachidier. Ces facteurs permettent de discriminer quatre groupes d'EAF aux caractéristiques singulières. Toutefois, elles présentent en commun un faible niveau d'intégration des activités de culture et d'élevage qui ne favorise pas l'expression de leur potentiel de production. Les systèmes de culture pratiqués par ces exploitations sont dominés par la rotation arachide/mil et la monoculture du mil, avec un apport de fumure organique. Les rendements, généralement faibles, augmentent de manière considérable avec l'intensification des cultures par l'apport d'engrais organique ou minéraux. Le respect du calendrier cultural, notamment des opérations de sarclage, est déterminant sur les résultats de production. La pratique de l'élevage n'est pas généralisée; elle est peu fréquente au niveau des EAF de type II. Les animaux sont conduits suivant des systèmes extensifs, mobiles ou sédentaires, aux performances de production faibles. L'élevage semi-intensif est peu pratiqué et concerne les équins, les bœufs de traits et/ou à l'embouche. Le fonctionnement et les performances de production de ces EAF pourraient être améliorés par l'association de légumineuses fourragères ou mixte avec les principales cultures qui permettrait une meilleure disponibilité fourragère au niveau des EAF de type I et IV, par l'adoption de pratiques d'agriculture de conservation, pour le type II, et par la pratique d'embouche bovine par les EAF de type III.

Chapitre III

**Co-conception de systèmes de culture en semis direct
sous couvert végétal (SCV) de *Stylosanthes hamata*
dans le bassin arachidier du Sénégal – Analyse des
opportunités, des contraintes et des comportements
des agriculteurs**

Chapitre III

**Co-design of direct seeding cropping systems under
Stylosanthes hamata in the groundnut basin of
Senegal – Analysis of opportunities, constraints and
behavior of farmers**

Dans ce chapitre non publié, une approche recherché-action en partenariat avec les producteurs a été mise en oeuvre pour co-concevoir des systèmes de culture innovants. Cette démarche est guidée par l'ambition de générer, avec les producteurs, des solutions efficaces et durables dans un contexte socio-économique et environnemental variable. Cette recherche a été menée en milieu paysan, avec des conditions d'expérimentation très contrastées et des niveaux d'engagements des acteurs variables. L'implication des producteurs à tous les niveaux de décisions et d'action a été assurée par la mise en place d'un dispositif composé de deux instances: un organe d'orientation et un autre pour la mise en oeuvre et le suivi. Les principaux résultats qui se rapportent à l'analyse des comportements des producteurs, leur capacité à innover de manière spontanée et à l'évaluation des performances de production en milieu paysan permettent de dégager des conditions d'adoption et les voies d'adaptation des technologies d'agriculture de conservation proposées.

Résumé

Des essais en milieu paysan ont été menés dans le bassin arachidier du Sénégal, pour appréhender les contraintes et les opportunités à l'introduction et à l'adoption du semis sous couvert végétal (SCV) de *Stylosanthes hamata* cv Verano, le comportement des producteurs et l'influence de variabilité du milieu sur les performances de production. Ils ont été menés sur trois ans, dans dix villages du département de Foundiougne. Sur chaque site, le dispositif comprenait quatre (4) rotations et/ou associations de cultures : (i) Jachère de *Stylosanthes hamata* sur 3 ans (JS-JS-JS), (ii) la rotation Arachide-*S. hamata* en année 1, Mil-*S. hamata* en année 2 et Arachide-*S. hamata* en année 3 (AS-MS-AS) (iii) la rotation MS-AS-MS et (iv) la culture pure de mil avec application de fumure organique (Mf-Mf-Mf). A partir de la 2^{ème} année, la biomasse de *S. hamata* a été partiellement recépée pour limiter sa concurrence vis-à-vis des cultures. Les contraintes techniques, logistiques et humaines liées à l'expérimentation et aux conditions en milieu paysan ont compromis le déroulement de l'essai qui n'a pu être menée que dans six sites (6) pour lesquels les résultats sont présentés. Ils montrent une importante variabilité du rendement de la culture principale en fonction des années, des sites, du type d'association et de l'application (ou non) recépage. Les rendements moyens annuels s'établissaient à 487 et 177 kg.ha⁻¹, pour le mil (respectivement dans la rotation Mf-Mf-Mf et dans les associations avec *S. hamata*) et à 276 kg.ha⁻¹ pour l'arachide. La biomasse maximale de *S. hamata* produite varie de manière significative, entre 94 et 5185 kg MS.ha⁻¹, en fonction des sites. L'interaction des facteurs rotation culturale et recépage n'a pas montré de différence significative entre les sites. Cependant, les effets du recépage ont été très significatifs sur la production de biomasse et la qualité nutritive du fourrage. Appliqué à bonne date, le recépage permet d'augmenter la production globale de biomasse aérienne de *S. hamata* et d'améliorer la valeur nutritive fourrage. Il constitue, avec l'application du sarclage dans la ligne de semis, des voies intéressantes d'investigation pour les systèmes de culture en SCV.

Mot clés : co-conception, systèmes de culture, semis direct, *Stylosanthes hamata*

Abstract

On-farm experimentation were conducted in the groundnut basin of Senegal, to understand the constraints and opportunities of introduction and adoption of sowing under *Stylosanthes hamata* cv Verano cover crop, the behavior of producers and the influence of environmental variability on the production performance. They were carried out over three years, in ten villages of the departement of Foundiougne. On each site, the experimental apparatus included four (4) crop rotations and/or associations : (i) Fallow of *Stylosanthes hamata* over 3 years (JS-JS-JS), (ii) Groundnut-*S.hamata* association the first year following millet-*S. hamata* association the 2nd year and Groundnut-*S.hamata* association the third year (AS-MS-AS), (iii) MS-AS-MS rotation and (iv) millet cultivation with application of organic manure (Mf-Mf-Mf). From the 2nd year, the biomass of *S.hamata* was partially cut back due to its level of competition with the crop. The technical, logistical and human constraints related to on-farm experimentation approach and the conditions and farming environment affected the progress of the experiment, which could only be carried out in the six (6) sites for which the results are presented. They show a significant variability in the yield of the main crop depending on the years, the sites, the type of association and the application (or not) of coppicing. Average annual yields were 487 and 177 kg per ha for millet (respectively in the Mf-Mf-Mf rotation and in the associations with *S.hamata*) and 276 kg per ha for groundnut. The maximum biomass of *S.hamata* produced varies significantly, between 94 and 5185 kg of dry matter per ha, depending on the sites. The interaction of crop rotation and coppicing factors did not show any significant difference between the sites. However, the effects of coppicing were very significant on the production of biomass and the nutritional value of the forage. Applied at the right time, coppicing increase the overall production of aerial biomass of *S.hamata* and improves the nutritional value of forage. It constitutes, with the application of weeding in the seeding line, interesting research focus for direct seeding under cover crop system.

Keywords : co-design, cover crop, direct seeding, *Stylosanthes hamata*

Introduction

L'agriculture pluviale est le principal mode de production des exploitations agricole familiales (EAF) du Sénégal ; elle concentre 60% des actifs et 95% des terres agricoles (MAER, 2009). Il s'agit souvent d'une agriculture de subsistance, peu résiliente aux risques climatiques et pratiquée sur de faibles superficies, avec une faible utilisation d'intrants (fertilisants, produits phytosanitaires). Dans ces conditions, les performances de production sont faibles pour assurer la sécurité alimentaire des EAF (Tittonell et al., 2010; Whitbread et al., 2010). Pour combler ce déficit et satisfaire la demande en produits alimentaires de base dans le bassin arachidier sénégalais, la stratégie paysanne a été d'augmenter les superficies cultivées à travers de nouvelles défriches et la réduction de la jachère (Graaff et al., 2011; Piraux 2000 ; Dièye et Guèye, 1998). Celle-ci a mis en évidence la fragilité de l'équilibre fonctionnel des agro-écosystèmes et induit la rupture de celui-ci, avec comme conséquences une baisse de la fertilité des sols (Badiane et al., 2000) et une stagnation ou une diminution des rendements agricoles (Aune et Bationo, 2008). La dépendance de l'agriculture aux conditions climatiques, de plus en plus aléatoires et aux amplitudes de variations importantes, exacerbe la baisse de productivité agricole. Dans ce contexte, un changement des pratiques, tourné vers une agriculture productive, durable et suffisamment résiliente aux risques climatiques, est nécessaire. L'agriculture de conservation (AC) est une des solutions techniques qui pourraient être adaptées aux conditions des EAF et améliorer durablement la productivité (Djamen Nana et al., 2015; Penot et al., 2015; Corbeels et al., 2014)

L'AC est basée sur trois principes fondamentaux : (i) l'absence ou la réduction du labour, (ii) la couverture végétale du sol et (iii) la rotation et/ou l'association de cultures adaptées. Les effets de l'AC sur les performances et la durabilité des systèmes de production familiaux sont très variables selon les conditions biophysiques et socio-économiques des EAF (Djamen Nana et al., 2015; Baldé, 2011; Erenstein, 2003). Les innovations agricoles conçues à partir des technologies d'AC peuvent être envisagées pour le bassin arachidier du Sénégal eu égard leur potentiel pour améliorer les performances des systèmes traditionnels (Camara et al., 2018; Tittonell et al., 2010), les pratiques traditionnelles de semis à sec du mil (non-labour) et de rotation des cultures (arachide-mil) qui convergent vers les fondements de l'AC. Toutefois, certaines pratiques traditionnelles, notamment celles de brulis des débris organiques à la surface du sol avant les semis et l'exportation des résidus de cultures, contrastent avec les pratiques d'AC (Lahmar et al., 2012; Badiane et al., 2000). Elles représentent des pertes considérables de matières organiques pour les sols cultivés, non compensées par les faibles apports de fumure organique. La recherche d'innovations qui visent à répondre à cette diversité de contraintes, de besoins et d'objectifs des agriculteurs familiaux nécessite l'adoption d'une démarche de recherche en partenariat pour co-concevoir des systèmes production durables (Ribeiro et al., 2015; Tittonell et al., 2010). Cette approche permet des réponses adaptées aux conditions biophysiques et socio-économiques des EAF (Whitbread et al., 2010; Sumberg, 2002); elle offre les meilleures garanties d'adoption des technologies conçues (Schlecht et al., 2007; Badiane et al., 2000). Toutefois, l'identification des besoins des agriculteurs et la co-conception d'innovations adaptées à leurs conditions et à leurs objectifs ne sont pas simples à mettre en œuvre, du fait du temps long requis et de l'importance des ressources nécessaires (Chia, 2004; Meinke et al., 2001).

Afin d'appréhender la diversité et la complexité des EAF et leurs systèmes de production, évaluer les contraintes et les opportunités d'innovations agricoles, une typologie des exploitations du sud-ouest du bassin arachidier a été réalisée (Camara et al., 2018). Sur la base de cette typologie, une expérimentation en milieu paysan a été menée dans le cadre du projet « Amélioration agro-écologique des systèmes de production intégrant le jatropha ». Elle visait à évaluer les effets de la variabilité des conditions biophysiques, les contraintes, les possibilités d'adoption et d'adaptation des innovations et à stimuler le processus d'innovation spontanée des agriculteurs.

III. 1. Matériels et méthode

1. 1. La zone et les conditions d'étude

L'étude a été menée dans le sud-ouest du bassin arachidier du Sénégal, dans le département de Foundiougne, caractérisé par un climat tropical soudano-sahélien avec une influence côtière. La

moyenne annuelle des précipitations enregistrées sur les différents sites expérimentaux était de 1145, 1035, 593 mm, respectivement en 2012, 2013 et 2014 (soient respectivement 71, 34 et 37 jours de pluies). Une longue saison sèche, d'octobre en juin, marque la période "d'arrêt" de production de la végétation naturelle. Le type de sol dominant, classé dans la catégorie "luvic acrisol" selon la classification de la FAO ("Food and Agriculture Organization") (Feller et al., 1987), est de texture sableuse avec une teneur en matière organique très faible, notamment pour les sites de Sadioga, Ndiaffé et Kimintang¹ (Tableau 5).

1. 2. Dispositif organisationnel

Le cadre de recherche en partenariat a été formalisé avec des Organisations villageoises de Producteurs (OP) regroupées en Fédération (FPTF). Pour assurer une participation effective des producteurs aux différentes instances de décisions et d'actions, un dispositif de gouvernance à deux niveaux a été adopté :

- un comité de pilotage qui regroupe l'ensemble des partenaires du Projet et composé au 3/7 de producteurs, pour définir la stratégie et identifier les moyens techniques et matériels ;
- un comité local de producteurs-expérimentateurs, chargé de la programmation des activités, de leur exécution, du suivi et de la gestion des parcelles pilotes, et de l'évaluation des résultats.

Ce dispositif était adossé sur une démarche en six étapes visant à favoriser l'expression des connaissances et la créativité des producteurs :

- i) Engagement de la FPTF au projet de recherche en partenariat, formalisé à travers une convention ;
- ii) Réalisation d'un diagnostic participatif (Camara et al., 2018) ;
- iii) Identification, par la FPTF, des producteurs-expérimentateurs en charge des parcelles pilotes ;
- iv) Formalisation de la question de recherche sur la base des résultats du diagnostic ;
- v) Conception du dispositif expérimental avec les producteurs, informations et formations sur les techniques culturales ;
- vi) Planification, suivi-évaluation des activités et capitalisation des bonnes pratiques, avec l'organisation de deux réunions annuelles et des visites de parcelles.

¹ Village affilié au groupement de Dantakhoune

Tableau 5 : Caractéristiques physico-chimiques du sol des sites d'expérimentation en milieu paysan

Sites	Granulométrie				Caractéristiques chimiques					
	Ag (%)	Lf (%)	Lg (%)	S (%)	pH _{eau}	pH _{KCl}	CE (.10 ² µS)	C (%)	Mg (mg/100g)	Ca (mg/100g)
Sadioga	6,25	4,75	8,75	80,25	5,31	4,25	0,41	0,308	0,797	7,456
Ndiaffé	4,5	1,75	9	84,75	5,44	4,75	0,31	0,286	0,418	6,203
Kimintang	4	3,5	5,5	87	5,25	4,14	0,205	0,296	2,696	0,564
Bambougar	6	3,25	6	84,75	5,83	4,97	0,32	1,538	2,316	9,962
KSG	6,75	1,25	3	89	5,3	4,42	0,235	1,845	0,418	5,576
Gaugué	4	1,25	4,5	90,25	5,16	4,57	0,39	1,845	1,177	7,456
Dantakhouné	10,25	3,75	6	80	5,62	5,07	0,48	6,765	2,316	23,747
KSB	5,25	6	7,5	81,25	5,37	4,89	0,47	4,305	1,936	16,855
Diaglè	3,25	2,5	4,25	90	5,87	4,87	0,62	1,688	1,936	6,830
Ndorong	7,75	2,75	7,25	82,25	5,88	4,84		2,153	2,316	9,336

1. 3. Dispositif expérimental

La mise en place des essais a concerné d'abord les sites de Bambougar, Dantakhoune, Félane, Keur Serigne Bamba (KSB), Keur Seyni Guèye (KSG) et Ndong Sérére, en 2012. Elle a été généralisée aux sites de Diaglè, Guagué, Kimintang, Ndiaffé et Sadioga, à partir de 2013. Chaque site était considéré comme une répétition des traitements. L'arachide et le mil ont été cultivés en association avec *Stylosanthes hamata* (L.) Taub., pour la couverture du sol et la production de fourrage. En outre, la restitution des tiges de mil et l'absence de labour ont été appliqués pour améliorer les performances et la durabilité des systèmes de culture. Le dispositif expérimental comprenait quatre assolements: (i) Arachide-*Stylosanthes hamata* (AS) en 1ère année, Mil-*S. hamata* (MS) en 2ème année, et AS en 3ème année (AS-MS-AS), (ii) MS-AS-MS, (iii) la culture continue de mil avec un apport de fumure organique (Mf-Mf-Mf) et (iv) la jachère pluriannuelle de *S. hamata* (JS-JS-JS). Chaque assolement était testé sur une surface de 529 m² (23 × 23 m). Les traitements avec *S. hamata* ont été divisés en deux sous-parcelles la dernière année, pour appliquer le recépage de la biomasse sur une partie. Celui-ci visait à limiter la concurrence de *S. hamata* vis-à-vis de la culture principale et à évaluer l'influence du recépage sur la productivité et la qualité fourragère. La nature, la qualité et la quantité de la fumure organique apportée, par épandage avant l'installation des cultures, étaient variables, selon la disponibilité du produit chez le producteur (tableau 6). Les doses annuelles de fumure organique s'établissaient en moyenne à 950 kg.ha⁻¹ de fumier de cheval, 1500 et 1900 kg.ha⁻¹ de fumier de vache, et 880 kg.ha⁻¹ de fumier de caprins, respectivement à Guagué Chérif, Keur Seyni Guèye, Keur Serigne Bamba (idem à Ndiaffé). Des variétés paysannes de mil étaient utilisées, afin d'éviter tout décalage de cycle par rapport aux autres champs dans la zone. Selon la disponibilité de semences d'arachide, deux variétés ont été utilisées: la GC8-35 (en 2012) et la Fleur 11 (en 2013 et 2014). L'arachide et le mil étaient semés à la densité moyenne de 90000 pieds.ha⁻¹ et 123200 pieds.ha⁻¹, respectivement. Lorsque les conditions le permettaient (accessibilité des sites), des visites ont été effectuées, à fréquence mensuelle, pour le suivi de l'exécution des opérations culturales.

Tableau 6 : Composition chimique (en % de la MS) des fumures organiques utilisées par les producteurs

Type de fumier	Sites	pH	C. org. (%)	N (%)	C/N	Cendres totales (%)	Ca (%)	Mg (%)
Bovins (non composté)	KSG, KSB, Dantakhoune	7,04 (±0,33)	29,68 (±4,34)	1,13 (±0,11)	26 (±03)	46,58 (±7,82)	0,35 (±0,07)	0,18 (±0,04)
	Guagué, Sadioga	6,86 (±0,27)	15,05 (±1,34)	0,57 (±0,20)	29 (±08)	72,90 (±2,42)	0,30 (±0,03)	0,09 (±0,02)
Equins et/ou asins	Kimintang	7,31 (±0,22)	6,53 (±2,25)	0,20 (±0,05)	32 (±06)	88,25 (±4,05)	0,24 (±0,01)	0,05 (±0,03)
Caprins								
Mat. Org. diverses	Ndiaffé	6,85 (±0,08)	23,56 (±5,25)	2,07 (±1,02)	13 (±04)	57,59 (±9,45)	0,41 (±0,12)	0,11 (±0,02)

1. 4. Mesure de l'engagement et de la capacité d'initiative des producteurs

L'engagement et la capacité d'initiative des producteurs ont été évalués individuellement avec des indicateurs qualitatifs par rapport aux objectifs de la recherche en partenariat et à la fonction de producteur-expérimentateur. Les indicateurs qui ont permis de renseigner le niveau d'engagement ont été principalement : l'exécution du calendrier des opérations culturales, la fréquence dans la parcelle d'expérimentation, la qualité de l'entretien de la culture et la mobilisation de ressources (fumure organique, par exemple). La capacité d'initiative et/ou d'innovation des producteurs est appréciée en considération de la description des problèmes et des solutions envisagées ou testées. Les visites de terrain ont servi à identifier les innovations conçues dans la pratique et à mesurer leurs effets, pour solutionner un problème spécifique. Toutes les contraintes relevées sur le terrain et les solutions

innovantes mises en œuvre par les producteurs ont été discutées en réunion de comité local de producteurs-expérimentateurs.

1. 5. Collecte et traitement des données

La caractérisation du sol a été réalisée sur des échantillons prélevés avant l'installation des essais. Un échantillonnage composite de cinq prélèvements, sur les 20 cm de la couche superficielle, a été effectué. Les échantillons de sols ont été séchés à l'ombre, broyés et tamisés (< 2 mm). Les analyses effectuées, pH, CEC, la matière organique, l'azote total, les cations échangeables (calcium, magnésium, potassium) et le phosphore total, ont été réalisées par des méthodes standardisées (Mathieu et Pielain, 1940).

Les productions de mil et d'arachide ont été déterminées par pesée de toute la récolte. Les composantes du rendement (les rapports gousses/fane ou poids-grain/poids-épis, poids 100 graines ou 1000 grains, etc.) ont été mesurées sur des échantillons de 50 pieds d'arachide ou 25 épis de mil.

La biomasse de *S. hamata* et de fane d'arachide produite a été mesurée par pesées de toute la production. En 2014, la biomasse de *S. hamata* a été mesurée au recépage et à la fin du cycle de la culture. Les échantillons de fourrage ont été prélevés à chaque fauche pour prédire leurs valeurs nutritives par spectroscopie proche infrarouge (Bertrand, 2002).

Les analyses statistiques des données ont été faites sur R (R Development Core Team 2015). L'analyse de la variance (ANOVA) et un test HSD (Honestly Significant Difference) de Tukey ont été effectués, pour différencier les valeurs fourragères de *S. hamata* des traitements.

III. 2. Résultats

2. 1. Installation des essais et établissement de *S. hamata*

Le semis des cultures a été effectué à différentes dates sur les sites, du fait de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie et/ou d'un retard de la mise en œuvre de certains producteurs. Différents facteurs ont favorisé ou compromis la réussite de l'installation des cultures, notamment *S. hamata* et le mil. A Diaglè, les orages en début de saison pluvieuse ont entraîné l'ensablement des semences et compromis la levée de *S. hamata*. La mauvaise installation de *S. hamata* sur les sites de Ndong, Guagué et Bambougar était essentiellement due à des problèmes de nature technique et secondairement à des contraintes environnementales. A Bambougar, la levée de *S. hamata* a été compromise par un semis profond des graines de *S. hamata*. A Ndong, une inondation de la parcelle, par les fortes pluies en début de saison, a fortement réduit la levée de *S. hamata*. Il s'en est suivi une mauvaise mise en œuvre du protocole expérimental par le producteur qui a fauché la biomasse de *S. hamata* avant même la maturation des graines. A Guagué, la consommation de la végétation par les animaux divaguant a montré la nécessité de mettre en place un dispositif de sécurité efficace renforcé de surveillance des parcelles. Toutes ces contraintes ont entravé la levée de *S. hamata* ou son ressemis naturel. Sur les sites où une bonne levée avait été observée, l'établissement de *S. hamata* a été très lent. D'autant que les pauses pluviométriques avec leur corolaire de stress hydriques avaient entraîné un flétrissement du *Stylosanthes*, notamment à Dantakhouné, Kimintang et Keur Serigne Bamba. Physiologiquement, cela s'est manifesté à travers l'orientation verticale des feuilles de *S. hamata* et leur coloration jaune pâle. L'établissement de *S. hamata* a été déterminant pour la poursuite de l'expérimentation sur les sites pilotes. Là où il a été compromis pour une raison ou une autre, notamment Bambougar, Diaglè, Félane, Guagué, Sadioga, les données ont été retirées du dispositif expérimental.

La levée du mil, compromise dans certains sites par la présence de chenilles, a été résolue par le regarnissage des lignes avec de jeunes plantules.

2. 2. Productions et rendements des cultures principales

Les rendements moyens des cultures, tous sites confondus, sont globalement faibles à moyens, en fonction du type d'association (tableau 7). Ils s'établissent, en moyenne, à 487 et 177 kg.ha⁻¹, pour le mil (respectivement avec application de la fumure organique et en association avec *S. hamata*) et à 276 kg.ha⁻¹ pour l'arachide. Cependant, les écarts de production sont importants: entre 20 à 1221 kg.ha⁻¹ de mil pour la rotation MS-AS-MS contre 391 à 1153 kg.ha⁻¹ de mil grains pour la rotation Mf-Mf-Mf, et de 158 à 533 kg.ha⁻¹ pour l'arachide (AS-MS-AS). L'application de la fumure organique

permet une augmentation de 1,5 à 5 fois de la production du mil. Les effets de la fumure organique sur les cultures en association ont été plus marqués à Kimintang, Ndiaffé et Keur Serigne Bamba. Les rendements de cultures ont été meilleurs à Ndiaffé, Keur Seyni Guèye et Keur Serigne Bamba, pour le mil, et à Kimintang, Keur Seyni Guèye et Keur Serigne Bamba, pour l'arachide. Le recépage de la biomasse de *S. hamata* permet une augmentation de 110% du rendement du mil contre 10% pour l'arachide. Les effets positifs du recépage sur la production de mil ont été obtenus à Kimintang, Ndiaffé et Keur Serigne Bamba; pour la production d'arachide, ils ont été observés à Kimintang et Keur Seyni Guèye. L'interaction des facteurs rotation culturale et recépage n'a pas montré de différence significative entre les sites. Il semble qu'une fois établi, *S. hamata* exerce une forte concurrence vis-à-vis de la culture du mil et de l'arachide qui limite la production.

Tableau 7 : Rendements moyens annuels (en kg.ha⁻¹) des cultures de mil et d'arachide

Sites / Parcelles	Mil AFO	Mil/Stylo	Arachide/Stylo
Dantakhouné	207,5 ±207	89,7 ±127	198,3 ±144
Kimintang	268,5 ±122	50,3 ±44	291,0 ±94
Ndiaffé	605,0 ±237	113,3 ±120	43,00 ±84
Keur Serigne Bamba	533,7 ±127	105,3 ±71	432,00 ±260
Keur Seyni Guèye	820,7 ±172	527,7 ±355	417,8 ±181
Moyenne	487,1	177,3	276,4

2. 3. Production et qualité fourragère de *S. hamata*

L'établissement lent de *S. hamata* s'accompagne d'une faible production de biomasse qui ne permet pas une utilisation fourragère ou une couverture efficace du sol, à la première année. La biomasse produite était très variable en fonction des sites (fertilité du sol et pluviométrie), de l'association culturale, de la qualité de l'établissement de stylosantes et de l'exécution des opérations culturales par le producteur. Elle a été plus faible à Ndiaffé (entre 7,9 et 14,56 kgMS.ha⁻¹) et supérieure à Dantakhouné (74,86 kgMS.ha⁻¹), pour le traitement JS-JS-JS, à Keur Seyni Guèye (35,56 kgMS.ha⁻¹), pour le traitement AS-MS-AS, à Keur Serigne Bamba (43,75 kgMS.ha⁻¹) pour le traitement MS-AS-MS. L'installation de *S. hamata* en culture pure (JS-JS-JS) a permis les productions les plus élevées de biomasse, 24 à plus de 370% supérieure par rapport à MS-AS-MS et 37 à 620% par rapport à AS-MS-AS. Selon la réussite de l'établissement de *S. hamata* et des conditions de recépage, la biomasse produite l'année suivante a été très variable (tableau 8). Les résultats obtenus ont montré un effet positif très significatif du recépage sur la quantité de biomasse produite, lorsque celui-ci est effectué à bonne date. En effet, une conséquence dépressive du recépage sur la production de biomasse a été observée sur le site de Ndiaffé où le producteur a retardé sa mise en œuvre. L'application tardive du recépage par rapport à la pluviométrie s'est traduite par la lignification des repousses de *S. hamata*, particulièrement dans la rotation JS-JS-JS. L'application du recépage dans ce dispositif avec quatre objets n'a pas été bien comprise par les producteurs au point que ceux de Ndiaffé et de Keur Seyni Guèye n'ont pas exécuté la mesure sur tous les traitements.

Tableau 8 : Production annuelle de biomasse de *S. hamata* (en kgMS.ha⁻¹) après établissement de la culture

Sites	Recépée			Non recépée		
	JS-JS-JS	MS-AS-MS	AS-MS-AS	JS-JS-JS	MS-AS-MS	AS-MS-AS
Kimintang	2342	2318	940	1236	1225	402
Dantakhouné	2476	669	762	916	323	308
Keur S. Bamba	3483	2188	2388	907	1403	842
Ndiaffé	94	514	ND	593	303	10
Keur Seyni Guèye	3365	ND	2292	5185	4580	3837
Moyenne	2352	1422	1595	1768	1567	1080

ND – Non déterminée (traitement manquant)

La composition chimique et la qualité fourragère de *S. hamata* sont données dans le tableau 9. On constate des différences très significatives ($p < 0,0001$) liée au recépage, pour tous les paramètres chimiques étudiés. Des variations importantes, de 3 à 5 points, du taux de matières protéiques totales ont été relevées entre les fourrages de différents âges, avec des concentrations plus élevées pour le fourrage recépé et des valeurs plus faibles pour celui fauché en une seule fois en fin de cycle végétatif. Par ailleurs, la digestibilité des protéines brutes chute de près de la moitié entre ces deux produits. Les teneurs en fibres du fourrage (cellulose, hémicellulose, ligne) augmentent naturellement avec l'âge du fourrage. Les fourrages du recépage et des repousses ont eu des teneurs en fibres plus faibles que celui des traitements non-recépés. La proportion de lignine, partie des fibres indigestibles par les animaux (ADL), par rapport aux fibres totales (NDF) varie dans le même sens; elle est de 16,32 et 17,68%, pour le fourrage recépé (respectivement de la 1ère et 2ème fauche) et de 17,96% pour le fourrage non-recépé. Ces différences se manifestent sur la variation de la digestibilité (*in vitro*) de la matière organique qui diminue en moyenne de 9 points (de 69,25 à 60,45%) entre les deux fauches des traitements recépés et de 5 points (60,45 à 55,09%) entre les fauches de fin de cycle des traitements recépés et ceux non-recépés. Les teneurs en minéraux varient dans le même sens, avec des écarts plus importants entre le fourrage de la 1ère fauche comparé aux autres dates de fauche. La détermination des minéraux majeurs (potassium, phosphore, magnésium, calcium, sodium) montre des variations identiques, sauf pour le phosphore et le magnésium pour lesquels des taux équivalents ont été observés entre les fourrages des fauches de fin de cycle des traitements recépés et non-recépés (tableau 10).

Tableau 9 : Composition chimique et qualité fourragère de la biomasse aérienne de *S. hamata*.

Gestion biomasse	Rang fauche	Traitement / Cultures	MM (% MS)	CEL (% MS)	MPT (% MS)	PBD (g/kg MS)	ADF (% MS)	NDF (% MS)	ADL (% MS)	CASEDMORT (% MS)	
Recépée	1ère fauche (mi-saison)	Stylo pur	10,22 ±1,27	26,69 ±1,32	14,75 ±1,71	101,87 ±15,96	32,18 ±1,44	38,57 ±1,21	6,27 ±0,43	72,77 ±2,65	
		Stylo/mil	9,77 ±0,72	30,73 ±2,48	14,89 ±1,28	103,14 ±11,91	36,22 ±2,35	44,27 ±2,89	7,25 ±0,69	66,91 ±3,14	
		Stylo/arachide	9,62 ±0,57	29,43 ±2,66	14,05 ±0,50	95,37 ±4,66	35,14 ±2,13	43,14 ±1,94	7,03 ±0,52	68,06 ±2,83	
		Moyenne	9,87	28,95	14,57	100,13	34,51	41,99	6,85	69,25	
	2ème fauche (fin de cycle)	Stylo pur	7,01 ±0,48	33,58 ±2,22	10,86 ±1,20	65,69 ±11,17	38,66 ±2,13	47,29 ±2,55	8,07 ±0,71	60,05 ±3,36	
		Stylo/mil	7,50 ±0,51	31,65 ±3,48	11,98 ±1,38	76,07 ±12,83	37,14 ±3,28	45,87 ±4,17	8,16 ±1,11	61,60 ±4,51	
		Stylo/arachide	7,16 ±0,35	32,45 ±0,49	11,86 ±0,21	75,01 ±1,94	38,24 ±0,25	46,71 ±0,98	8,50 ±0,21	59,70 ±0,32	
		Moyenne	7,20	32,56	11,57	72,26	38,01	46,62	8,24	60,45	
	Non recépé	Fauche unique en fin de cycle	Stylo pur	6,58 ±0,99	35,83 ±4,53	9,76 ±2,30	55,51 ±21,38	41,04 ±4,65	49,66 ±5,59	9,02 ±1,04	54,06 ±8,09
			Stylo/mil	6,56 ±0,78	36,06 ±2,48	9,96 ±1,65	57,35 ±15,35	41,51 ±2,85	50,73 ±3,68	9,05 ±0,56	54,29 ±4,54
Stylo/arachide			7,03 ±0,48	35,21 ±2,06	10,96 ±0,41	66,63 ±3,84	40,32 ±2,31	48,95 ±3,02	8,75 ±0,77	56,92 ±3,55	
Moyenne		6,72	35,70	10,23	59,83	40,96	49,78	8,94	55,09		
Moyenne globale			7,96***	32,47***	12,12***	77,40***	37,87***	46,16***	8,01***	61,57***	

MS - Matières sèche; MM – Matières minérales; CEL – Cellulose brute; MPT – Matières protéiques totales; PBD – Protéines brutes digestibles; ADF – Fibres au détergent acide; NDF – Fibres au détergent neutre; ADL – Lignine; CASEDMORT – Digestibilité in vitro (cellulase) de la matière organique.

*** Différence hautement significative ($p < 0,001$) entre les traitements

Tableau 10 : Teneur en minéraux (en g/kg MS) du fourrage de *S. hamata*

Gestion biomasse	Rang fauche	Traitement / Cultures	K	P	Mg	Ca	Na
Recépée	1ère fauche (mi-saison)		14,29			20,98	
		Stylo pur	±3,79	2,77 ±0,73	4,51 ±0,65	±1,27	1,77 ±0,41
		Stylo/mil	15,18	2,90 ±0,28	4,33 ±0,27	18,82	1,84 ±0,23
		Stylo/arachide	±3,82	2,80 ±0,55	4,47 ±0,32	±0,88	1,86 ±0,22
		Moyenne	14,28	2,82	4,44	19,77	1,82
	2ème fauche (fin de cycle)					16,23	
		Stylo pur	7,14 ±2,30	2,26 ±0,45	3,24 ±0,41	±0,75	1,29 ±0,50
		Stylo/mil	6,90 ±2,27	2,30 ±0,30	3,40 ±0,17	±0,45	1,32 ±0,24
		Stylo/arachide	±3,82	2,32 ±0,40	3,27 ±0,16	±0,27	1,19 ±0,18
		Moyenne	6,98	2,29	3,30	16,37	1,27
Non recépé	Fauche unique en fin de cycle				16,07		
		Stylo pur	6,06 ±2,33	2,35 ±0,30	3,01 ±0,59	±1,60	0,84 ±0,36
		Stylo/mil	6,20 ±3,11	2,21 ±0,56	3,18 ±0,54	±1,71	1,17 ±0,14
		Stylo/arachide	±3,82	2,39 ±0,35	3,41 ±0,21	±0,83	1,38 ±0,21
		Moyenne	6,34	2,32	3,20	15,92	1,13

K – Potassium; P – Phosphore; Mg – Magnésium; Ca – Calcium; Na – Sodium.

2. 4. Contraintes de l'expérimentation en milieu paysan

Dans le bassin arachidier, les contraintes liées à la démarche de recherche-action en partenariat avec les producteurs ont été de trois types: techniques, environnementales et sociales.

L'installation et l'établissement de *S. hamata* ont été techniquement compromis sur certains sites par la profondeur des semis, le transport des graines par les eaux de ruissellement et l'inondation temporaire avec pour conséquence le pourrissement des semences. En effet, le semis superficiel des graines de *S. hamata* n'a pas été appliqué sur tous les sites malgré les indications et la communication en amont. Cette situation est occasionnée par la participation de la population locale à l'opération de semis alors qu'elle n'était pas suffisamment informée des modalités d'installation de la culture. L'entraînement des semences par les eaux de pluies a considérablement réduit le ressemis de *S. hamata* à Dantakhone. Les semences transportées par les eaux ont colonisé les terres environnantes de la parcelle expérimentale. Les conditions difficiles d'établissement de *S. hamata*, à Ndong et Diaglè, semblent écarter l'installation de la culture sur des sites exposés à l'érosion hydrique ou à l'inondation précoce.

Les conditions environnementales ont le plus souvent défavorisé la réussite de l'expérimentation en milieu paysan. L'éloignement entre les sites et l'inaccessibilité de certains durant toute la deuxième moitié de la saison pluvieuse ont rendu difficile la supervision et le suivi des essais, notamment à Félane et à Bambougar. Le site de Kimintang a enregistré des attaques des termites des parties souterraines et le collet de la culture de *S. hamata*. Celles-ci, observées à la floraison du *Stylosanthes*, après l'arrêt des pluies, ne devraient pas favoriser son ressemis naturel. L'ouverture de l'espace rural, après les périodes de culture, aux divagations des animaux rend presque impossible le maintien d'une couverture permanente du sol en saison sèche. Certes les périodes de restriction de la divagation du bétail garantissent le développement de la plante de couverture mais elles ne couvrent pas toute la durée de fructification et de maturation de graines de *S. hamata*.

La nature et la complexité des relations sociales dans le village ont influencé parfois le choix du producteur pilote, réalisé par la population. Des critères subjectifs fondés sur le statut social du candidat (fils du chef de village, par exemple) ou sa position de point focal communautaire (santé

communautaire, électrification rural, forage ou adduction d'eau), garantissent à certains leur intégration au projet même s'ils ne montrent pas des niveaux d'engagement suffisants.

2. 5. Engagement et créativité des producteurs

L'engagement des producteur-expérimentateurs a été très variable. Les producteurs de Keur Seyni Guèye, Keur Serigne Bamba et Kimintang ont montré un niveau d'engagement élevé à travers leur présence fréquente dans la parcelle pilote, l'exécution des opérations culturales à bonne date malgré une pluviométrie erratique, les quantités de fumures organiques mobilisées et apportées à la culture du mil, leurs initiatives dans la recherche de solutions aux problèmes spécifiques. Ces producteurs ont été les précurseurs de certaines innovations conçues au cours de la recherche-action, notamment le sarclage dans la ligne de semis pour réduire la concurrence de *S. hamata* (Keur Serigne Bamba), la récolte des semences de *S. hamata* par séchage et battage de la biomasse (Keur Seyni Guèye), la technologie de récupération des graines de *S. hamata* des enveloppes par vannage et tamisage après un pilonnage (Kimintang). En outre, un processus spontané d'apprentissage a été observé chez les producteurs. En effet, pour tester la profondeur de semis et/ou améliorer leurs connaissances de la plante, ils ont initié des tests de levée, dans des pots, avant le semis de stylosanthes en plein champ ou matérialisé les poquets de semis au champ. Ceci a permis l'identification de *S. hamata* parmi les espèces adventices et le sarclage de la parcelle en début de culture. Cette approche paysanne d'apprentissage par la pratique a été décrite lors des réunions d'évaluation et les visites de terrain, pour mettre en corrélation l'engagement du producteur et les résultats obtenus.

Les producteurs de Bambougar, Félane, Diaglè, Guagué, Dantakhouné et Ndiaffé ont été les moins engagés dans la réalisation de l'essai. Ce manque d'engagement s'est manifesté particulièrement par le mauvais entretien des cultures, le retard dans l'application des tâches culturales et la mauvaise application du protocole de culture. L'option de les exclure du programme de recherche a été envisagée et permis de revitaliser les activités à Dantakhouné et Ndiaffé. Pour les autres sites, l'interruption des activités du projet s'est avérée inévitable.

III. 3. Discussion

La démarche de recherche-action en partenariat reflète le souci de sortir des méthodes classiques et de générer des connaissances qui permettent de résoudre des problèmes agronomiques et/ou sociaux importants (Faure et al., 2010). L'adoption de cette démarche vise à apporter des solutions agronomiques durables et adaptées aux capacités et à la situation des exploitations familiales (Vall et al., 2016). Dans le bassin arachidier sénégalais, les problèmes majeurs auxquels il faut répondre sont les baisses de fertilité des sols et de rendements agricoles. Les résultats de cette recherche dépendent nécessairement du contexte socio-économique et agro-écologique mais aussi du choix des acteurs impliqués et des stratégies mises en œuvre.

La mise en place d'organes de décision et d'orientation (comité de pilotage), d'exécution et de suivi de l'expérimentation (comité local de producteurs-expérimentateurs), d'une part, et d'une stratégie de communication entre les acteurs (réunions, visites des sites), d'autre part, ont été indispensables pour assurer une dynamique d'ensemble, renforcer les capacités d'initiatives des producteurs et faciliter les échanges d'expériences sur le processus de génération de technologies novatrices. L'efficacité de ce dispositif pour le suivi et la réussite des essais agronomiques a été très limitée en raison des conditions d'expérimentation (distance, accessibilité saisonnière, etc.) et du contrôle irrégulier de la réalisation des opérations dont certaines sont sous la dépendance de facteurs climatiques. En effet, certaines opérations culturales (sarclage, application d'engrais, etc.) sont traditionnellement exécutées par les populations après la pluie. Dans cette situation, une pause pluviométrique de longue durée retarde considérablement le calendrier agricole. Le contrôle régulier qui aurait pu permettre de donner des orientations techniques et de compenser les défaillances dans le choix des acteurs est rendu impossible du fait de l'accessibilité et de l'éloignement des sites. La légitimité des acteurs impliqués dans la recherche doit être assurée sur des considérations objectives (Chia, 2004), malgré la complexité des relations sociales dans le village et le privilège dont jouit certains. Les raisons avisées ayant motivé le choix de la FPTF pour le partenariat n'ont pas été suffisantes pour garantir un plein engagement de l'ensemble de producteurs impliqués dans le processus de recherche-action. Il semble également qu'un niveau d'investissement plus élevé dans l'information et la formation technique des acteurs est

nécessaire pour assurer une bonne installation de *S. hamata*. Ceci aurait permis l'application correcte de l'itinéraire technique, notamment un semis superficiel (< 2 cm) en début de saison pluvieuse, essentiel à la bonne levée de la culture (Breman et al., 1998).

Les conditions physiques d'expérimentation ont montré trois critères majeurs de différenciations pédoclimatiques entre les sites. La mobilisation, par les producteurs, de terres marginales caractérisées par des inondations récurrentes (Dantakhoune, Ndong) ou un risque élevé d'érosion (Diaglé) a négativement affecté la réussite des essais sur ces sites: ce qui indique l'inadéquation de ces types de terres à la culture de *Stylosanthes*. En outre, elle illustre l'indisponibilité de terres cultivables dans la zone et les limites du partenariat qui devraient susciter un minimum d'encadrement de la responsabilité des acteurs par des cahiers de charge. En effet, il est établi que la quasi-totalité des terres cultivables du bassin arachidier est mise en culture tous les ans faisant disparaître les jachères : 97,4% du disponible foncier est mis en culture, en 2004, dans la région administrative de Fatick qui englobe notre zone d'étude (Dione et al., 2008). La fertilité réduite du sol, notamment à Kimintang, Ndiaffé et Sadioga où les teneurs en matières organiques sont en dessous du seuil critique (Groot et al. 1998) avec parfois un déséquilibre calci-magnésique (Kimintang), explique en partie les résultats des performances de production. Les teneurs élevées de matières organiques enregistrées à Dantakhoune et Keur Serigne Bamba s'expliquent par la jachère pluriannuelle appliquée à ces sols. Celle-ci est liée à l'éloignement des champs par rapport aux villages et de leur situation de terres inondables. La baisse importante de la pluviométrie enregistrée en 2014 par rapport à celles de 2012 et 2013, respectivement de 550 et 440 mm, a été néfaste pour les cultures (stress hydrique du mil et de *S. hamata*) et les rendements. Les principales manifestations de la sensibilité au stress hydrique de *Stylosanthes* (jaunissement et disposition à la verticale des feuilles) ont été observées autour des termitières, réputées plus argileuses.

Dans ces conditions très aléatoires d'expérimentation, les rendements obtenus sont très variables entre les sites mais ils restent généralement faibles et comparables à ceux des petites exploitations de la zone (Camara et al., 2018). Cette variabilité des performances corrobore les résultats de Baldé (2011) qui montrent que le potentiel de production des systèmes de culture en SCV est très instable en expérimentation en parcelles de producteurs ; il dépend des conditions d'expérimentation et de l'engagement du producteur dans la réalisation des tâches culturales. Les résultats d'expérimentation prometteurs obtenus à Keur Seyni Guèye et Keur Serigne Bamba découlent particulièrement de l'engagement des producteurs à réaliser les tâches culturales à temps doublé de conditions pluviométriques plus favorables dans ces localités par rapport à la moyenne du département. Par ailleurs, la quantité et la qualité de la fumure organique (teneurs en matière organique, en azote, équilibre du ratio C/N) ont été meilleures pour ces sites. La diversité de la qualité des fumures organiques rend problématique l'application d'une dose de fertilisation unique (Blanchard et al., 2014). La concordance de l'ensemble de ces facteurs indique que les systèmes de culture en SCV exigent les mêmes conditions de culture que ceux traditionnels (fertilité sol, pluviométrie, entretien culture, etc.).

La production de biomasse de *S. hamata* utilisable n'est possible qu'à partir de la deuxième année en raison de la lenteur de l'établissement de la culture. A partir de la deuxième année, les quantités produites sont importantes, surtout à Keur Seyni Guèye, comparables à celles obtenues par Coulibaly (1996) en amélioration des pâturages. Les principaux facteurs pouvant expliquer cette performance de production à Keur Seyni Guèye sont les conditions pluviométriques plus favorables et l'engagement du producteur (quantité et qualité de la fumure organique, entretien des cultures). Cette production importante de biomasse exerce une concurrence sur la culture principale qui peut être limitée par le recépage et le sarclage dans la ligne de semis introduit dans le protocole expérimental, de manière spontanée, par le producteur de Keur Serigne Bamba. Cette forme d'adaptation des technologies d'AC a été mise en exergue par Dos Santos Ribiero et al. (2015) au Brésil où les producteurs pratiquaient un labour périodique pour répondre à un besoin agronomique. Outre son effet atténuant sur la concurrence entre les cultures, le recépage de la biomasse a été essentiel pour l'amélioration de la valeur fourragère de *S. hamata*. Les teneurs en protéines brutes ou digestibles, en fibres, et la digestibilité du fourrage ont été optimisées avec l'application du recépage. Ces avantages fourragers de la culture de *S. hamata*, particulièrement dans un système de gestion de la biomasse par le recépage, en font une solution potentiellement intéressante pour renforcer les synergies entre les cultures et l'élevage dans le bassin arachidier, à travers une meilleure sécurisation du système d'affouragement.

L'ouverture de l'espace rural et la divagation du bétail dès l'entame de la saison sèche renforcent la nécessité de faucher la biomasse de *S. hamata*. Cependant, elle se traduit par des exportations importantes de nutriments du sol qui doivent être compensées avec des apports réguliers et conséquents de fumure organique, surtout que leur niveau de fertilité est généralement faible. Les manquements enregistrés indépendamment du déficit d'engagement des producteurs semblent indiquer que la mise au point de systèmes de culture en SCV de *S. hamata* requiert une formation soutenue des producteurs, une stratégie de communication adaptée, un suivi-évaluation et une révision des options techniques. Dans ce processus qui peut être long, des taux élevés d'abandon ou d'échec sont généralement observés, notamment les premières années (Penot et al., 2015). Ceux enregistrés à la première et deuxième année, respectivement 66% et 45%, correspondent aux valeurs décrites à Madagascar (Penot et al., 2015). Les causes de ces échecs étaient liées principalement à l'engagement du producteur, aux conditions pédoclimatique et la divagation du bétail. En plus de la protection des cultures contre la divagation des animaux, les conditions de réalisation du SCV de *S. hamata* semblent liées à une fertilité suffisante du sol et une limitation efficace de sa concurrence vis-à-vis de la culture principale. Pour ce faire, la recherche devrait s'orienter vers la définition de modalités de fumure organique, de recépage de la biomasse de *S. hamata* et de sarclage dans la ligne de semis efficaces pour assurer une meilleure fertilité du sol, une production plus importante de fourrage de qualité et des rendements satisfaisants de la culture.

Conclusion

La co-conception de technologies agricoles se heurte à de nombreuses contraintes environnementales, techniques, logistiques et humaines qui affectent les résultats de l'expérimentation en champs paysans. Les écarts de rendements des cultures sont généralement très importants du fait de la grande variabilité des conditions pédologique et pluviométrique entre les essais mais aussi de la gestion des cultures. Les rendements les plus élevés ont été obtenus avec la fumure organique sur mil, à Keur Seyni Guèye, Ndiaffé et Keur Serigne Bamba. Une fois établie (à partir de la 2^{ème} année), *S. hamata* concurrence la culture principale ; ce qui se traduit par des baisses importantes des productions de mil et d'arachide qui peuvent être atténuées par le recépage de sa biomasse et/ou le sarclage dans la ligne de semis. Ces pratiques de gestion de la biomasse de *S. hamata* qui constituent des voies intéressantes d'investigation pour les systèmes de culture en SCV permettent d'augmenter les rendements d'arachide et de mil de 10 et 111%, respectivement. En outre, le recépage permet d'augmenter la biomasse de *S. hamata* produite (de 80 à 106%) et d'améliorer la qualité nutritive du fourrage, à condition d'être appliqué à la bonne date. Le maintien d'une partie de la biomasse produite pour la couverture du sol, en début de saison sèche, est incompatible avec la divagation des animaux.

A condition d'être affinés et adaptés aux réalités des exploitations familiales du bassin arachidier, les systèmes de culture en SCV de *S. hamata* peuvent favoriser le développement de synergies entre les cultures et l'élevage et renforcer leur potentiel de production de fumure organique. Pour cela, le savoir faire des producteurs et leur créativité qui ont été démontrés dans une démarche de recherche-action en partenariat pourraient être des leviers pour l'adoption de ces technologies innovantes.

Chapitre IV

**Mise au point de systèmes de culture en semis direct
sous couvert végétal (SCV) - Performances de
production et évolution des propriétés chimiques des
sols**

Chapitre IV

**Development of direct seeding mulch-based cropping
systems (DSMS) - Production performance and
evolution of soil chemical properties**

Le chapitre 4 traite de l'expérimentation en station visant à mettre au point des systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV) de *Stylosanthes hamata* inspirés des systèmes traditionnels. La recherche en station est essentielle pour tester, comprendre et mesurer les effets des facteurs agronomiques et les performances des systèmes de production. Elle est complémentaire de la démarche de recherche en milieu paysan dans la mesure où elle permet une plus grande maîtrise des conditions d'expérimentation. Les systèmes testés combinent différentes pratiques agroécologiques (association/rotation, fumure organique, etc.) dans le but de diversifier les composantes des systèmes de production et d'améliorer les interactions entre elles. Elle promeut des formes simples d'intégration entre agriculture et élevage basées sur les systèmes de production et les pratiques traditionnelles. Cette similitude avec les pratiques traditionnelles dans le bassin arachidier conjuguée aux services agronomiques et écologiques potentiels augmentent les possibilités d'adoption par les exploitations agricoles familiales (EAF). Les contraintes spécifiques aux systèmes de culture en SCV qui se sont manifestées en cours d'expérimentation ont été abordées dans une perspective de recherche de solutions adaptées aux conditions des EAF.

Résumé

Une expérimentation en station a été menée, entre 2012 et 2014, pour déterminer les meilleures modalités d'installation d'un couvert végétal de *Stylosanthes hamata*, évaluer les performances de production et la durabilité des systèmes en SCV. L'étude comparait huit systèmes de culture, dont cinq en SCV de *S. hamata* et trois systèmes de culture traditionnels améliorés (STA), selon un dispositif en blocs (4) randomisés. Les parcelles de culture (association et/ou rotation) ont été divisées, pour appliquer deux niveaux (avec ou sans) de fumure organique et deux modalités de gestion de la biomasse de *Stylosanthes* (recépage ou non recépage). Il ressort de cette étude que les performances de production des systèmes en SCV sont significativement plus faibles que ceux des STA. Les rendements moyens annuels de mil grains s'établissaient entre 29 et 250 kg.ha⁻¹ dans systèmes en SCV contre 200 et 865 kg.ha⁻¹ pour les STA. Concernant la production d'arachide, les rendements en gousses ont varié de 378 à 867 kg.ha⁻¹ pour les systèmes en SCV contre 641 et 1708 kg.ha⁻¹ pour ceux des STA. Cette perte de production est corrélée à la production de biomasse végétale de *S. hamata* qui exerce une concurrence vis-à-vis de la culture principale. L'apport de fumure organique peut être efficace pour juguler les effets dépressifs de *S. hamata* sur le rendement du mil, à conditions que les apports hydriques soient satisfaisants. Les effets positifs du recépage de la biomasse de *S. hamata*, sur le rendement du mil et de l'arachide, ont été très limités. En outre, la fauche permet d'augmenter la production totale de biomasse et sa valeur nutritive aux fins d'alimentation animale. La fertilité chimique du sol a été affectée de manière significative par le type d'assolement, l'application de fumure organique et la combinaison de ces facteurs. Des gains de carbone importants, jusqu'à 1,54 g.kg⁻¹ (soit +70%), ont été obtenus par l'application de fumure organique. Toutefois, une baisse de la teneur en azote du sol est observée, principalement avec la restitution des tiges mil et sans apport de fumure organique. Les systèmes de culture en SCV *S. hamata*, avec apport de fumure organique, ont permis les meilleurs équilibres de nutriments du sol.

Mot clés : Système de culture, *Stylosanthes hamata*, production, fertilité chimique.

Abstract

An on-station experiment was carried out between 2012 and 2014 to determine the best methods for installing a plant cover of *Stylosanthes hamata*, to assess the production performance and sustainability of direct seeding system (DSS). The study compared eight systems, including five DSS under *S. hamata* and three traditional systems, according to a device in blocks (4) randomized. The crop plots (association and/or rotation) were divided, to apply two levels (with or without) of organic manure and two methods of management of the biomass of *S. hamata* (cutting back or not). It appears from this study that the production performance of DSS is significantly lower than traditional systems. The average annual yields of grain millet were between 29 and 250 kg per ha in DSS against 200 and 865 kg per ha in the traditional systems. Concerning groundnut production, pod yields varied from 378 to 867 kg per ha in DSS against 641 and 1708 kg per ha in traditional systems. This loss of production is correlated with the plant biomass of *S. hamata* which competed the main crop. Adding, organic manure can be effective in suppressing the depressive effects of *S. hamata* on millet yield. The positive effects of coppicing the *Stylosanthes* biomass on the yield of millet and groundnut were very limited. Mowing increases the total production of biomass and its nutritional value for animal feed. Soil fertility was significantly affected by the rotation, organic manure application and combined factors. Significant carbon gains, up to 1.54 g per kg (+70%), were obtained by applying organic manure. A drop in the nitrogen content of the soil is observed, mainly with the return of millet stalks and without organic manure. DSS, with application of organic manure, allowed the best balance of soil nutrients.

Keywords : Cropping systems, *Stylosanthes hamata*, production, soil fertility

Introduction

La productivité agricole des systèmes de culture en Afrique subsaharienne est fortement limitée par la faible fertilité des sols, notamment les teneurs en matière organique (MO) et en éléments nutritifs (Djamen Nana et al., 2015; Nacro et al., 2010; Aune et Bationo, 2008). Le mode d'exploitation en continu, sans apport conséquent de fumure organique, conjugué à l'exportation de toute la biomasse aérienne produite ont favorisé des baisses importantes de teneurs en nutriments des sols (Koulibaly et al., 2010; Groot et al., 1998). Dans le bassin arachidier du Sénégal, la chute de la productivité agricole est étroitement liée aux baisses de la fertilité du sol (Aune et Bationo, 2008; Khouma et al., 2005). Dès lors, la nécessité de restaurer cette fertilité, notamment le stock de matière organique, se pose souvent comme un impératif, pour des raisons de productivité et de durabilité des systèmes de cultures (Razafimbelo et al., 2006). Parmi les voies d'amélioration de la matière organique du sol, l'apport de fumure organique, le maintien au champ des résidus de culture et la culture d'une plante de couverture sont considérés comme les plus efficaces (Odunze, 2002; Groot et al., 1998). Cependant, la fumure organique se heurte souvent aux contraintes liées à sa production au niveau des exploitations familiales d'Afrique subsaharienne (Landais et Lhoste, 1990) et à son transport des lieux de production et de stockage vers les champs (Dièye et Guèye, 1998) qui compromettent sa faisabilité technique. Dans le bassin arachidier du Sénégal, les quantités de fumier produit au niveau des exploitations familiales sont faibles; elles dépendent de la taille du cheptel et du système d'affouragement qui sont, eux mêmes, fonction de la disponibilité du fourrage au niveau de l'exploitation (Coly et al., 2013; Dièye et Guèye, 1998). Dans ce contexte, l'intégration d'une légumineuse de couverture dans les systèmes de culture pourrait être une solution, pour une intensification durable des systèmes de production du bassin arachidier. L'intensification se rapporte à des niveaux d'utilisation des ressources productives pour produire plus avec les mêmes unités de surface cultivée ou d'animaux (unités bétail tropical, UBT). Outre, le développement de synergies entre l'agriculture et l'élevage à travers l'amélioration du système d'affouragement et de la production de fumure organique, elle permet de conserver la fertilité des sols par les apports de carbone racinaire et foliaire et la fixation symbiotique d'azote (Doso, 2014; Johansen et al., 2012; Razafimbelo et al., 2006; Craswell and Lefroy, 2001). Cette technologie relève de l'agriculture de conservation (AC) qui regroupe un ensemble de pratiques culturelles répondant à trois critères: (i) une perturbation minimale du sol, (ii) une protection du sol par un couvert végétal permanent et (iii) une diversification des cultures par des rotations et/ou des associations culturales (Dos Santos Ribiero et al., 2015; Hauswirth et al., 2015; Lahmar et al., 2012). Les possibilités de développer des systèmes de culture en SCV de *S. hamata* ont été testées en station expérimentale dans le cadre de la thèse de doctorat. Ces essais visaient à identifier les meilleures modalités d'intégration de *S. hamata* dans la rotation traditionnelle arachide-mil pratiquée dans le bassin arachidier, afin d'améliorer les performances et la durabilité de ces systèmes. Leurs performances, la durabilité et/ou les conditions de leur mise oeuvre sont évaluées en termes de rendements (grains, gousses et fourrage), de contraintes et options techniques, de qualité du fourrage produit et l'évolution de la fertilité chimique du sol.

IV. 1. Matériels et méthode

1. 1. Site expérimental

L'expérimentation a été menée, entre 2012 et 2014, au niveau de la ferme expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture (ENSA) de Thiès (14°45' de lat. Nord; 16° 53' de long. Ouest) au Sénégal. Le site est soumis à l'influence du climat sahélo-soudanien, avec une saison pluvieuse qui s'étale de juillet à octobre. Les pluviométries enregistrées en 2012, 2013 et 2014 s'établissaient à 767 mm, 603 mm et 331 mm, respectivement.

Le sol est de texture sableuse avec une faible teneur en matière organique (1,53 à 1,84 %). L'analyse granulométrique de la couche arable (< 20 cm) indique des proportions de 89 à 91% de sable, 5 à 6% de limons et 4 à 5% d'argile. La capacité d'échange cationique (CEC) se situe entre 2,09 et 2,16 meq.100g⁻¹; le p_H_{eau} est établi entre 7,3 et 7,9 et le p_H_{KCl}, entre 5,7 et 6,5.

1. 2. Traitements et plan d'expérience

L'expérience comportait huit assolements disposés en blocs randomisés de quatre répétitions, sur des parcelles de 240 m². Les cultures en association et/ou en rotation portaient sur le mil (*Pennissetum glaucum* (L.) R. Br.), l'arachide (*Arachis hypogea* (L.)) et *Stylosanthes hamata* (L.) Taub. (Stylo). Les systèmes de culture en SCV de stylosanthes comportaient cinq modalités d'association et/ou de rotation: (i) Jachère de stylosanthes en 1^{ère} année, association mil – stylosanthes en 2^{ème} année, association arachide – stylosanthes en 3^{ème} année (JS–MS–AS), (ii) JS–AS–MS, (iii) AS–MS–AS, (iv) MS–AS–MS et MS–MS–MS. Ils ont été combinés, à partir de la 2^{ème} année, avec deux niveaux de fumure organique : sans application de fumure organique (SAFO) ou application de fumure organique (AFO), pour compenser les pertes de nutriments du sol à travers l'exportation des produits (récoltes et fourrage). La fumure était apportée sous forme de poudrette de parc bovins, à la dose de 10 tonnes de matière brute par hectare (Fernandes et al., 2000). Elle présentait, respectivement pour la 1^{ère} et 2^{ème} ou la 3^{ème} année, les caractéristiques chimiques suivantes : humidité (27,3 et 28,8%), pH (7,6 et 7,7), cendres totales (36,5 - 48,3% de MS), carbone total (30,9 et 26,2% de MS), azote total (2,4 et 1,6% de MS), calcium (6,02 et 4,25 g.kg⁻¹), magnésium (2,47 et 0,24 g.kg⁻¹). En 3^{ème} année d'expérimentation, deux modalités de gestion de la biomasse de stylosanthes et des adventices ont été appliquées aux systèmes de culture en SCV : (i) recépage et exportation de la biomasse à 60 jours après le semis du mil ou de l'arachide, (ii) sans recépage de la biomasse. L'introduction du recépage de la biomasse a été la réponse testée pour contenir la concurrence de *S. hamata* vis-à-vis de la culture principale. Ces systèmes de culture en SCV étaient comparés avec trois STA, basés sur la rotation Arachide-Mil (A–M–A et M–A–M) ou la monoculture du mil avec AFO à la dose de 10 t.ha⁻¹ (Mf–Mf–Mf). L'amélioration de ces systèmes traditionnels consistait à la réduction du labour (une fois sur 3 ans) et au maintien des tiges de mil sur le sol après la récolte. Le semis de toutes les cultures a été réalisé en poquet, après un labour à la charrue à disques sur une profondeur de 20 cm (en 1^{ère} année) et directement sous le couvert végétal, les années suivantes. En 1^{ère} année, un sarclage, en début de cycle (10-14 jours après semis), a été effectué dans les traitements en SCV; trois sarclages ont été appliqués tous les ans dans les traitements des STA. Une irrigation d'appoint d'environ 150 mm (en 2012 et en 2013) et 180 mm (en 2014), apportée en huit doses d'arrosage par aspersion, a été appliquée pour satisfaire les besoins en eau de stylosanthes estimés entre 700 et 900 mm par an (Chandra, 2009). Après les récoltes, un couvert végétal, composé de tiges de mil et/ou de la biomasse aérienne de stylosanthes produits *in situ*, a été maintenu sur le sol (tableau 11).

Tableau 11 : Quantités moyennes (en kg.ha⁻¹) de biomasse végétale utilisée pour constituer le couvert végétal des traitements

Années	Type de litière	JS–MS–AS	JS–AS–MS	AS–MS–AS	MS–AS–MS	MS–MS–MS	A–M–A	M–A–M	Mf–Mf–Mf
2012	Stylo	839	938	1167	188	542	0	0	0
	Mil	0	0	0	2031	1680	0	1992	2130
	Total	839	938	1167	2219	2326	0	1992	2130
2013	Stylo	961	1194	1581	430	916	0	0	0
	Mil	1270	0	1114	0	987	1678	0	2554
	Total	2231	1194	1641	143	1292	1678	0	2554
2014	Stylo	1391	1218	1415	1152	1901	0	0	0
	Mil	0	414	0	182	266	0	1184	1802
	Total	1391	1632	1415	1334	2167	0	1184	1802

1. 3. Collectes de données et analyses des échantillons

La productivité et le rendement des cultures d'arachide et de mil ont été déterminés par mesure de la production totale. Les mesures de paramètres de rendements portaient, pour l'arachide, sur le nombre de gousses par pieds, les rendements au décortilage et le poids de 100 graines, et pour le mil, sur le poids des épis et de 1000 grains. Ils ont été mesurés sur un échantillon de 50 pieds, répartis de manière aléatoire sur cinq lignes de semis. Le développement des cultures a été évalué par des mesures de la longueur et du poids des tiges, sur le mil, et de la hauteur et du nombre de ramifications de *S. hamata* (uniquement en 1^{ère} année). Les biomasses de tiges de mil, de fane d'arachide et de *S. hamata* ont été déterminées par pesées de toute la production en fin de culture. La biomasse de *S. hamata* au recepage a été mesurée sur cinq carrés de rendements. La valeur fourragère de *S. hamata* a été prédite par spectroscopie proche infrarouge.

La composition chimique du sol a été déterminée sur des échantillons composites prélevés annuellement, avant l'apport de fumure organique et l'installation des cultures, sur les 20 cm de l'horizon supérieur et à la densité minimale d'un prélèvement pour 50 m². L'échantillon moyen obtenu sur chaque unité de surface a été séché à l'air, broyé puis tamisé à 2 mm. Les analyses effectuées ont été réalisées par des méthodes standardisées (Mathieu et Pieltain, 1940). Le pH a été déterminé par lecture d'une suspension diluée de sol dans l'eau (ou une solution de KCl normale) au ratio de 1/2,5 (masse/volume). La CEC a été déterminée par la méthode d'acétate d'ammonium à pH-7 décrite par Metson (Mathieu et Pieltain, 1940). La matière organique a été déterminée par titrimétrie à partir du dosage l'excédent de bichromate de potassium utilisé pour l'oxydation du carbone. L'azote total a été dosé par la méthode Kjeldhal; les cations échangeables (calcium, magnésium, potassium) l'ont été par dosage, à partir de l'extrait de la solution d'acétate d'ammonium. Les teneurs en phosphore total ont été déterminées par la méthode de Bray et Kurtz (Bray n° 2).

1. 4. Analyses statistiques des données

Les analyses statistiques ont été réalisées sur R (R Development Core Team 2015) selon trois méthodes de traitement des données: les modèles linéaires généralisés (MLG), l'analyse par classification en arbre de décision (CART - "Classification And Regression Tree") et l'analyse en composantes principales (ACP). Ils ont permis de prédire les réponses des agro-systèmes, à partir de variables prédictives qui composent les différents traitements (AFO ou SAFO, rotation, bloc, répétition). Les MLG ont été appliqués de façon séparée pour chacune des réponses prédites (C-organique, pH_{KCl}, N, P, etc.) en utilisant la fonction GLM de R avec une distribution gaussienne de l'erreur. La fonction "stepAIC" de R, basée sur le critère Akaike (1974) et le cerclage de démarrage, a été utilisée pour déterminer le GLM optimal et pour ajuster les données. Un test de comparaison multiple de Tukey a, ensuite, été effectué, pour détecter des différences significatives entre les traitements. Dans chaque modèle GLM optimal, l'importance de chaque prédicteur de la réponse mesurée a été estimée avec la fonction "varImp" de R. L'utilisation de la CART pour prédire différentes réponses écologiques, à partir d'une large gamme de variables environnementales, est évoquée par plusieurs auteurs (Aertsen et al, 2010; Maindonald & Braun, 2007; Jones et al, 2006). La méthode CART est utilisée dans cette étude pour identifier efficacement et caractériser les traitements qui affectent les caractéristiques chimiques du sol. L'interprétation et l'applicabilité des résultats de la CART sont simplifiées avec l'adoption de la méthode d'arbre unique d'inférence conditionnelle (Hothorn et al., 2006). Elle permet de corroborer, de visualiser et de retracer les effets des prédicteurs les plus influents de la classification. Une ACP a été effectuée pour estimer la contribution globale des prédicteurs et leurs corrélations.

IV. 2. Résultats

2. 1. Productivité et rendements des cultures

2. 1. 1. Production et rendements du mil

Les productions totales de mil en grain des différentes rotations sont déterminées par la fréquence de la culture dans la rotation et des systèmes de culture (SCV ou STA). A fréquence de culture de mil égale dans l'assolement, les STA ont eu un cumul de production supérieur à celui des systèmes en SCV (tableau 12). Les rendements moyens annuels des STA variaient entre 200 et 865 kg.ha⁻¹,

supérieur à ceux des systèmes en SCV de stylosanthes qui s'établissaient entre 29 et 250 kg.ha⁻¹. En effet, l'association *S. hamata* avec la culture du mil a affecté négativement la production de celle-ci comparée aux STA, dans des proportions de 6 à 41%, en année d'installation du Stylo, et entre 12 et 92% les années suivantes. Il est apparu que *S. hamata* exerce une forte concurrence vis-à-vis de la culture qui se traduit par d'importantes baisses de rendements.

Tableau 12 : Production cumulée de mil des systèmes de cultures

Assolement/Rotation	JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	A-M-A	M-A-M	Mf-Mf-Mf
Production								
Nombre de cycle de production	1	1	1	2	3	1	2	3
Production totale de grain (kg.ha ⁻¹)	196	29	184	264	549	200	1142	2591
Production moyen par cycle de culture (kg.ha ⁻¹)	196	29	184	132	183	200	571	864
Poids 1000 grains (g)	4,72 ±0,62	4,89 ±0,22	4,53 ±0,28	4,66 ±0,63	4,78 ±0,50	5,48 ±0,78	4,46 ±0,90	4,67 ±0,93

La fumure organique a eu un effet positif sur la production dont l'intensité était variable en fonction des années. En 2013, l'apport de fumure organique a permis d'augmenter les rendements en mil grains des traitements en SCV de *S. hamata* à des niveaux comparables à celui de la rotation Mf-Mf-Mf, soient respectivement 254 contre 249 kg.ha⁻¹. Les rendements des traitements en SCV SAFO variaient entre 138 et 183 kg.ha⁻¹ et celui de la rotation A-M-A était de 200 kg.ha⁻¹. En 2014, l'AFO a permis des rendements de 53 à 214 kg.ha⁻¹ (tableau 2), dans les systèmes en SCV, significativement différents des rendements de 342 et 611 kg.ha⁻¹ obtenus dans les rotations M-A-M et Mf-Mf-Mf (respectivement). Toutefois, la fumure organique a été un facteur d'amélioration de la production lorsqu'on compare les systèmes de culture en SCV entre eux : elle permet une augmentation de 53 à 238% du rendement. Par ailleurs, les effets de la fumure organique, sur la production, sont cumulatifs avec ceux du recépage; ils permettent des augmentations de 52 à 185 kg.ha⁻¹ (soient 206 à 638%) de la production (tableau 13). En effet, le recépage a été un moyen efficace de gestion de la biomasse végétative, pour réduire la concurrence de stylosanthes et augmenter relativement la production. Il a permis une augmentation du rendement de 12 à 116 kg.ha⁻¹, soient de 28 à 128%.

Tableau 13 : Effets de la fumure organique et du recépage sur le rendement (kg.ha⁻¹) de mil.

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Rotation					p
		JS-AS-MS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	M-A-M	Mf-Mf-Mf	
AFO	Recépage	214a,A (±130)	69a,B (±35)	95a,AB (±16)		611 (±242)	<i>p</i> <0,05
	Non recépage	98ab (±54)	54a (±32)	53b (±25)			<i>p</i> >0,05
Sans AFO	Recépage	66b,A (±13)	29ab,B (±20)	62ab,AB (±36)	342		<i>p</i> <0,05
	Non recépage	29c,A (±22)	17b,B (±9)	31b,A (±12)	(±134)		<i>p</i> <0,05
Moyenne		102B	42C	60BC	342A	611A	<i>p</i> <0,001
p		<i>p</i> <0,05	<i>p</i> <0,05	<i>p</i> <0,001			

Le poids de 1000 grains a été très variable, d'une rotation à l'autre et selon les années. En 2012, il était meilleur pour les rotations MS–MS–MS et M–A–M, avec respectivement 3,85 et 3,70 g. Le poids des grains a été supérieur dans les rotations A–M–A (5,47 g) et MS–MS–MS (5,40 g), en 2013, et dans celles Mf–Mf–Mf (5,37g) et M–A–M (5,23 g), en 2014. Un effet cumulatif positif de la fumure organique et du recépage a été mesuré sur le poids des grains (tableau 14).

Tableau 14 : Poids de 1000 grains de mil (g) des traitements

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Rotation					p
		JS–AS–MS	MS–AS–MS	MS–MS–MS	M–A–M	Mf–Mf–Mf	
AFO	Recépage	5,06a (±0,14)	5,18a (±0,33)	5,13a (±0,18)		5,37 (±0,74)	p>0,05
	Non recépage	4,80ab (±0,25)	4,94ab (±0,33)	4,98ab (±0,12)			p>0,05
Sans AFO	Recépage	4,94ab (±0,21)	4,84ab (±0,18)	5,01ab (±0,16)	5,23 (±0,51)		p>0,05
	Non recépage	4,77b (±0,14)	4,73b (±0,13)	4,75b (±0,26)			p>0,05
Moyenne		4,89	4,92	4,97	5,23	5,37	p>0,05
p		p<0,05	p<0,05	p<0,05			

2. 1. 2. Production et rendements de l'arachide

La production cumulée de gousses d'arachide dépend du rendement de la culture et de la fréquence de production dans la rotation. Elle a varié entre 378 kg.ha⁻¹ et 3416 kg.ha⁻¹ (tableau 15). Le rendement est déterminé par la densité de pieds à la récolte, le nombre de gousses pleines et le poids des graines. La densité à la récolte a été très variable selon les années, avec une moyenne de 78264 pieds par hectare. La production de gousses par pied, établie en moyenne à 7,68, était généralement supérieure dans les traitements des STA, notamment A–M–A. La variabilité de ces facteurs d'une année à l'autre et de leurs combinaisons a influencé les rendements qui ont été significativement différents entre les rotations. Des rendements de 2909 kg.ha⁻¹ ont été obtenus dans la rotation A–M–A contre 641 kg.ha⁻¹, pour la rotation M–A–M.

Le SCV de stylosanthes s'accompagne d'une baisse des rendements par rapport aux STA qui a atteint des proportions importantes, de 89% à 92%, à partir de la deuxième année. Les effets de la concurrence du stylosanthes sur le rendement sont réduits par le recépage de la biomasse (tableau 16). En effet, des augmentations de 95 à 383 kg.ha⁻¹ du rendement, soient de 13 à 101%, ont été permise par le recépage en comparaison des traitements non recépés. L'effet de la fumure organique sur le rendement de l'arachide a été irrégulier entre les rotations JS–MS–AS et AS–MS–AS.

Le rendement au décorticage a varié entre 65 et 70%, avec une moyenne de plus de 67%. Le poids de 100 graines n'a pas été significativement différent entre les traitements de la même année, malgré une tendance à un meilleur remplissage des gousses pour les STA. Cependant, il a été significativement plus faible, en 2014, soit en moyenne 75 g contre 84 g, du fait de l'utilisation de variété différente. D'une part, le SCV de Stylo a favorisé la production de graines plus petites; d'autre part, l'AFO et le recépage n'ont pas eu de répercussions sur le poids des graines.

Tableau 15: Performances moyens de production d'arachide des systèmes de cultures

Assolement/Rotation Production	JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	A-M-A	M-A-M	Moyenne
Nombre de cycle de production	1	1	2	1	2	1	
Densité moyenne à la récolte	91780 ±12008	61927 ±10622	92582 ±12389	69 937 ±16 705	92524 ±9815	60 833 ±5253	78264
Nombre de gousses/pieds	7,02 ±1,95	7,15 ±2,75	7,42 ±3,37	8,26 ±2,55	8,65 ±2,09	7,60 ±0,52	7,68
Rdt au décortilage (%)	65,88 ±10,82	68,66 ±3,60	64,78 ±10,21	65,40 ±8,282	70,33 ±5,8	69,31 ±2,245	67,39
Production cumulée (kg.ha ⁻¹)	378	697	1240	867	3416	641	1206
Production par cycle culture (kg.ha ⁻¹)	378	697	620	867	1708	641	818,5
Poids 100 graines (g)	71,63 ±7,93	83,88 ±16,85	71,08 ±5,74	83,28 ±7,46	81,75 ±10,76	85,57 ±11,5	79,53

Tableau 16 : Effets du recépage et de la fumure organique sur le rendement gousses (kg.ha⁻¹)

Facteur 2: AFO	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Rotation			p
		JS-MS-AS	AS-MS-AS	A-M-A	
AFO	Recépage	1053 ^a (±565)	722 (±273)		<i>p</i> >0,05
	Non recépage	887 ^a (±383)	627 (±284)		<i>p</i> >0,05
Sans AFO	Recépage	761 ^a (±201)	903 (±506)	2909 (±579)	<i>p</i> >0,05
	Non recépage	378 ^{b,B} (±162)	797 ^A (±119)		<i>p</i> <0,05
Moyenne		770^B	762^B	2909^A	<i>p</i> <0,001
p		<i>p</i> <0,05	<i>p</i> >0,05		

2. 2. Biomasses et qualité fourragère

2. 2. 1. Production de biomasses

La biomasse de *S. hamata* produite en année d'installation de la culture a été très variable: entre 188 et 1167 kg MS par hectare, respectivement pour les traitements MS-AS-MS et AS-MS-AS (tableau 17). Les résultats montrent une différence significative de la production de biomasse de stylosanthes, déterminée par le type d'association. L'association *S. hamata*-arachide a donné la meilleure production que celle *S. hamata*-mil ou l'installation de stylosanthes en culture pure. Elle est marquée par le meilleur développement de la culture, dans l'association *S. hamata*-arachide, illustrés par la hauteur des pieds de stylosanthes et le nombre de ramifications plus élevés.

Tableau 17 : Développement et production de biomasse de *S. hamata* en année d'installation (Année 2012)

Assolement / Rotation	Hauteur (cm)	Ramifications	Production (kg MS.ha ⁻¹)
JS-MS-AS	44,21b ±4,81	9,28b ±1,49	839ab ±323
JS-AS-MS	44,98b ±6,96	9,50b ±0,69	938ab ±588
AS-MS-AS	50,71a ±2,69	11,37a ±0,38	1167a ±573
MS-AS-MS	37,12c ±6,32	7,38c ±1,20	188c ±141
MS-MS-MS	48,80ab ±2,94	9,03b ±0,85	542b ±229
Moyenne	45,16	9,31	735
<i>p</i>	<i>p</i> <0,05	<i>p</i> <0,05	<i>p</i> <0,05

Après l'établissement de la culture, la production de stylosanthes croît entre la deuxième et la troisième année, en moyenne de 1016 à 4028 kg MS.ha⁻¹ (tableau 18). Cependant, des différences significatives de production existent entre les différentes modalités de culture du Stylo. En 2013 et 2014, la biomasse produite a été plus importante dans la rotation AS-MS-AS (1581 et 4517 kg MS.ha⁻¹); celle de la rotation MS-AS-MS a été la plus faible (430 et 3585 kg MS.ha⁻¹). Toutefois, plusieurs facteurs affectent à différents niveaux la production de stylosanthes dans la rotation. Le profil granulométrique du substrat avec une proportion élevée de sable semble favoriser une meilleure production de biomasse du Stylo.

Tableau 18 : Production moyenne (kg MS.ha⁻¹) de biomasse de *S. hamata* après installation de la culture

Assolement / Rotation	Production 2013	Production 2014	Production totale
JS-MS-AS	961b ±530	3631b ±1357	4592
JS-AS-MS	1194b ±706	3583b ±912	4777
AS-MS-AS	1581a ±977	4517a ±1453	6098
MS-AS-MS	430c ±119	3585b ±1077	4015
MS-MS-MS	916b ±272	4824a ±1316	5740
Moyenne	1016	4028	5044
<i>p</i>	<i>p</i> <0,05	<i>p</i> <0,05	

Le recépage de la biomasse a permis généralement d'augmenter la production totale de stylosanthes (tableau 19). Cependant, son effet n'a été significatif que dans la rotation JS-MS-AS, majoré par l'AFO. En effet, l'influence du recépage dans les traitements SAFO a été irrégulière: neutre pour JS-AS-MS, modérément dépressif pour MS-AS-MS (-8,5%) et AS-MS-AS (-9,5%) et nettement bonifiant pour JS-MS-AS (+112%) et MS-MS-MS (+47%). La fumure organique n'affecte pas de manière significative la quantité de biomasse de *S.hamata*.

Tableau 19 : Effets du recépage et de la fumure organique sur la production de biomasse de *S. hamata* en 3^e année (2014) de rotation (en kg MS.ha⁻¹)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1 : Rotation					Moyenne	p
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS		
AFO	Recépi	4210ab,B (±2193)	3390B (±496)	4885A (±2429)	3203C (±898)	5589A (±1581)	4255	<i>p</i> <0,001
	Non recépi	3452ab,AB (±1367)	2885B (±1442)	3770A (±702)	3841A (±574)	3790A (±939)	3548	<i>p</i> <0,01
Sans AFO	Recépi	4662a,B (±1597)	4086BC (±1291)	4470B (±893)	3486C (±1568)	5837A (±2069)	4508	<i>p</i> <0,01
	Non recépi	2200b,C (±273)	3972B (±419)	4942A (±1787)	3811B (±1268)	4080B (±674)	3801	<i>p</i> <0,001
Moyenne		3631B	3583B	4517A	3585B	4824A	4028	<i>p</i> <0,01
p		<i>p</i> <0,05	<i>p</i> >0,05	<i>p</i> >0,05	<i>p</i> >0,05	<i>p</i> >0,05		

Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes pour les objets comparés. Les lettres minuscules permettent de distinguer les objets comparés au sein d'une même rotation, les lettres majuscules permettent de distinguer les objets entre rotations.

En 2012, le rendement en fane d'arachide était de 885 et 1 015 kg MS.ha⁻¹, respectivement pour les rotations AS-MS-AS et A-M-A. Il montre une diminution de 130 kg MS.ha⁻¹ de la biomasse de la fane d'arachide en SCV comparé à la rotation traditionnelle. En 2013, les quantités de fane d'arachide s'établissaient à 1026, 1460 et 1601 kg MS.ha⁻¹, respectivement pour JS-AS-MS, MS-AS-MS et M-A-M : ce qui traduit une diminution de la biomasse de fane d'arachide, de 141 à 574 kg MS.ha⁻¹, des systèmes de culture en SCV comparés à la rotation traditionnelle M-A-M. Les résultats de 2014 ont confirmé les différences observées entre les systèmes en SCV et les STA (tableau 20). La production moyenne de fane d'arachide des systèmes de culture en SCV (JS-MS-AS et AS-MS-AS) était de moitié plus faible que celle de la rotation A-M-A : 1,5 t MS.ha⁻¹ contre près de 3,7 t MS.ha⁻¹. Le SCV de *S. hamata* diminue considérablement la biomasse de fane, notamment dans les traitements non recépés. En effet, le recépage de la biomasse de stylosanthes a permis d'augmenter de 3 à 27% la biomasse de fane dans les traitements avec une fumure organique et de 19 à 41 % dans ceux sans fumure organique. Il semble que l'AFO réduit l'influence du recépage sur la production de fane d'arachide. En outre, l'étude n'a pas montré d'effets de la fumure organique sur la quantité de fane d'arachide produite.

Tableau 20 : Effets du recépage et de la fumure organique sur la production de fane d'arachide (kg MS.ha⁻¹)

Facteur 2: AFO	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Rotation		
		JS-MS-AS	AS-MS-AS	A-M-A
AFO	Recépi	1704 (±288)	1934 (±706)	
	Non recépi	1337 (±395)	1867 (±885)	
Sans AFO	Recépi	1644 (±801)	1386 (±284)	3699 (±1021)
	Non recépi	1380 (±785)	982 (±403)	
Moyenne		1516	1542	3699

La biomasse de tiges de mil produite, à l'installation de *S. hamata* (2012), était de 2031, 1680, 1992 et 2130 kg MS. ha⁻¹, respectivement pour les rotations MS-AS-MS, MS-MS-MS, M-A-M et Mf-Mf-Mf. La présence de la légumineuse ne semble pas affecter la quantité de tiges produites à la première année. Après l'installation, *S. hamata* exerce une concurrence qui réduit la biomasse de tiges produite, de 26 à 49 %. Des quantités de 987 à 1294 kg MS. ha⁻¹ ont été produites lors de la 2^e année dans les systèmes de culture en SCV contre 1678 à 2554 kg MS. ha⁻¹ des rotations A-M-A et Mf-Mf-Mf (respectivement). Cette différence s'est accentuée, en 2014, malgré une diminution de la biomasse dans les STA (tableau 21). En SCV, l'effet de la rotation n'a été significatif que pour les traitements SAFO. En moyenne, l'AFO a permis d'augmenter la biomasse de tiges, de 52% dans les STA et de 47% dans les systèmes en SCV. Un effet significatif du recépage sur la biomasse de tiges a été observé dans les rotations JS-AS-MS et MS-MS-MS.

Tableau 21 : Effet de la fumure organique et du recépage sur la biomasse de tiges (kg MS.ha⁻¹)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					p
		JS-AS-MS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	M-A-M	Mf-Mf-Mf	
AFO	Recépage	692a,A (±451)	218A (±113)	298ab,A (±49)		1802B (±308)	p<0,05
	Non recépage	396b,A (±218)	227A (±141)	214b,A (±107)			p<0,05
Sans AFO	Recépage	356b,A (±87)	166B (±128)	336a,AB (±188)	1184C (±245)		p<0,05
	Non recépage	211c,AB (±162)	118B (±73)	215b,A (±89)			p<0,05
Moyenne		414	182	266	1184	1802	p<0,001
p		p<0,05	p>0,05	p<0,05			

Les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes pour les objets comparés. Les lettres minuscules permettent de distinguer les objets comparés au sein d'une même rotation, les lettres majuscules permettent de distinguer les objets entre rotations.

2. 2. 2. Qualité nutritive du fourrage de *S. hamata*

La qualité nutritive du fourrage de *S. hamata* est appréciée à partir de la composition chimique prédite, notamment les teneurs en minéraux totaux, en cellulose brute, en matières protéiques totales, en fibres (NDF et ADF) et de la digestibilité in vitro de la matière organique. Pour tous les paramètres chimiques, l'étude montre des différences très significatives ($p<0,0001$) liées au recépage de la biomasse végétale.

Dans les traitements recépés, la concentration en minéraux du fourrage diminue de 1,53 et 1,66 point, entre la première et la deuxième fauche, respectivement en application de fumure organique et sans application de fumure organique (tableau 22). Les teneurs en minéraux du fourrage des traitements recépés ont été supérieures à celui des traitements non recépés de 0,59 à 2,56 points, selon le rang de la fauche (1^{ère} ou 2^{ème}) et de l'application (ou non) de la fumure organique.

Tableau 22 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en minéraux (en %)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	9,66	9,68	9,78	9,58	9,05	9,55
	Recépi (2eme fauche)	7,91	8,74	7,95	7,90	7,59	8,02
	Non recépi	7,16	7,69	7,08	6,79	8,40	7,43
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	9,77	9,88	9,78	10,03	9,76	9,85
	Recépi (2eme fauche)	7,67	7,99	8,60	7,84	8,84	8,19
	Non recépi	7,33	7,45	7,32	7,14	7,20	7,29
Moyenne		8,25	8,57	8,42	8,21	8,47	

Les variations de la teneur en matières azotées totales (MAT) ont été fonction de l'âge du fourrage et du rang de recépage. Des baisses de 3 points ont été relevées entre la première et la deuxième fauche (tableau 23), atteignant 5 points par rapport au fourrage des traitements non recépés. Les teneurs MAT correspondent à des valeurs de protéines brutes digestibles (PBD) de 117 à 134 g/kg MS du fourrage de la première fauche, contre 87 à 116 g/kg MS et 66 à 104 g/kg MS pour le produit de la deuxième fauche et celui des traitements non recépés (respectivement).

Tableau 23 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en matières protéiques totales (en %)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	16,92	17,02	17,71	18,18	16,39	17,24
	Recépi (2eme fauche)	14,74	16,25	14,34	13,90	13,19	14,48
	Non recépi	12,05	13,15	12,32	11,00	14,98	12,70
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	17,67	17,60	17,36	18,15	17,09	17,58
	Recépi (2eme fauche)	13,68	14,03	15,24	14,17	15,56	14,54
	Non recépi	12,81	13,47	11,79	12,01	12,15	12,45
Moyenne		14,65	15,26	14,79	14,57	14,89	

Les teneurs en fibres du fourrage (cellulose, hémicellulose, ligne) augmentent naturellement avec l'âge du fourrage. Ainsi, les variations de la cellulose brute sont moins importantes entre le fourrage de la première et la deuxième fauche (des repousses) comparées au fourrage des traitements non recépés (tableau 24). Les teneurs en ADF (fibres au détergent acide) et NDF (fibres au détergent neutre) varient de manière similaire à celle de la cellulose brute (tableaux 25 et 26).

Tableau 24 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur en cellulose brute (en %)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	31,53	28,93	30,16	30,18	32,21	30,60
	Recépi (2eme fauche)	30,79	27,81	31,67	32,29	34,81	31,48
	Non recépi	36,58	33,98	35,51	38,81	29,58	34,89
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	30,61	29,10	30,10	29,67	31,09	30,11
	Recépi (2eme fauche)	31,45	31,52	29,56	32,29	28,69	30,70
	Non recépi	34,54	34,11	36,87	37,39	35,59	35,70
Moyenne		32,58	30,91	32,31	33,44	32,00	

Tableau 25 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur (en %) en ADF (fibres au détergent acide)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	37,17	34,76	35,66	35,59	37,33	36,10
	Recépi (2eme fauche)	36,22	33,14	36,30	36,98	39,98	36,52
	Non recépi	41,85	39,11	41,43	43,82	34,58	40,16
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	35,91	34,11	35,06	34,07	35,87	35,00
	Recépi (2eme fauche)	36,62	36,55	34,42	36,83	33,55	35,60
	Non recépi	39,45	39,04	41,69	43,82	40,70	40,94
Moyenne		37,87	36,12	37,43	38,52	37,00	

Tableau 26 : Effets de la fumure et du recépage sur la teneur (en %) en NDF (fibres au détergent neutre)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	47,19	43,81	44,88	44,43	45,69	45,20
	Recépi (2eme fauche)	43,11	39,32	43,89	45,07	47,44	43,77
	Non recépi	50,09	46,90	48,45	50,34	41,07	47,37
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	45,54	44,18	43,93	43,95	45,57	44,63
	Recépi (2eme fauche)	44,39	43,94	41,74	44,19	41,49	43,15
	Non recépi	47,12	47,07	48,42	50,23	47,56	48,08
Moyenne		46,24	44,20	45,22	46,37	44,81	

La teneur en fibres indigestibles pour les animaux (lignine) est plus élevée dans le fourrage de la deuxième fauche et celui des traitements non recépés : 16 à 18% pour le produit de la première fauche contre 18 à 20% pour les autres types de fourrages. Ceci affecte la digestibilité (*in vitro*) de la matière organique qui diminue, en moyenne, de 4 à 5 points entre les deux fauches des traitements recépés, de 6,8 à 8,7 points entre les fauches de fin de cycle des traitements recépés et ceux non-recépés et de 11,25 à 13,65 points entre la première fauche et celle des traitements non recépés. Cette variation de la digestibilité de la matière organique est modérée par l'application de la fumure organique. En effet, on observe une différence de 0,5 à 2 points de la variation de la digestibilité liée à l'AFO (tableau 27).

Tableau 27 : Effets de la fumure et du recépage sur la digestibilité (*in vitro*) de la matière organique du fourrage (en %)

Facteur 2: Fumure	Facteur 3: Recépage	Facteur 1: Assolement / Rotation					Moyenne
		JS-MS-AS	JS-AS-MS	AS-MS-AS	MS-AS-MS	MS-MS-MS	
AFO	Recépi (1ère fauche)	63,43	68,34	66,55	67,21	65,07	66,12
	Recépi (2ème fauche)	62,76	65,09	62,30	62,12	56,24	61,70
	Non recépi	52,36	56,59	52,88	48,89	63,65	54,87
Sans AFO	Recépi (1ère fauche)	66,52	69,02	68,04	70,42	67,28	68,26
	Recépi (2ème fauche)	60,70	62,01	65,09	61,73	66,99	63,30
	Non recépi	56,80	57,06	52,79	52,48	53,89	54,60
Moyenne		60,43	63,02	61,28	60,47	62,19	

2. 3. Fertilité chimique du sol

2. 3. 1. Acidité du sol et teneurs en nutriments

L'étude n'a pas montré d'effets significatifs, liés au recépage de la biomasse, sur la fertilité chimique des sols ($p > 0,05$). En conséquence, nous n'accorderons pas de considérations à ce facteur dans l'analyse des résultats de fertilité chimique des sols. Cependant, des différences significatives liées aux blocs ont été observées sur l'ensemble des paramètres de fertilité chimique des sols ($p < 0,05$).

Le pH H₂O du sol a varié entre 6,86 et 7,23. De façon générale, une diminution du pH du sol de 0,15 à 0,20 unités a été observée (tableau 28). Cependant, l'AFO permet d'atténuer cette tendance à l'acidification des sols. En effet, il existe des différences significatives liées à l'AFO, notamment entre la rotation Mf-Mf-Mf et les autres traitements. Un effet significatif de la rotation sur le pH a été mis en évidence, entre les systèmes de culture en SCV. Il montre que la rotation MS-AS-MS se différencie des autres, avec des baisses plus importantes du pH.

La teneur moyenne initiale en carbone du sol était établie à 2,17 g.kg⁻¹. Son évolution a montré des gains variables dépendant principalement de l'AFO et, secondairement, de l'assolement (tableau 28). Les traitements SAFO ont enregistré des gains de carbone plus faibles, de moitié au quart, par rapport à ceux avec AFO. La fréquence de la culture du mil dans la rotation a été le second facteur de variation de la matière organique du sol. En effet, pour les traitements SAFO, les gains ont été plus faibles au niveau des rotations JS-MS-AS (0,31 g.kg⁻¹), JS-AS-MS (0,27 g.kg⁻¹), AS-MS-AS (0,17 g.kg⁻¹) et M-A-M (0,17 g.kg⁻¹). La rotation Mf-Mf-Mf a donné le gain de C-organique le plus important (1,54 g.kg⁻¹) ayant permis une teneur de 3,71 g.kg⁻¹ du sol après trois années d'expérimentation. Ceci coorespond à une augmentation moyenne annuelle de 20% du taux de C-organique du sol (soit 70% globalement). Les effets des facteurs "Blocs", "Rotations" et "AFO ou SAFO", sur la teneur en C-organique du sol, sont analysés à travers l'arbre à décision (figure 6). Celui-ci montre une singularité du bloc 4 comparé aux autres (blocs 1, 2 et 3). Au niveau de ce dernier

groupe (blocs 1, 2 et 3), les rotations JS-MS-AS (R1), JS-AS-MS (R2), AS-MS-AS (R3), A-M-A (R6) et M-A-M (R7) se distinguent de MS-AS-MS (R4) et MS-MS-MS (R5). L'effet de la rotation dans le bloc 4 permet de distinguer JS-MS-AS (R1) et JS-AS-MS (R2), d'une part, d'AS-MS-AS (R3), MS-AS-MS (R4), MS-MS-MS (R5), A-M-A (R6) et M-A-M (R7), d'autre part.

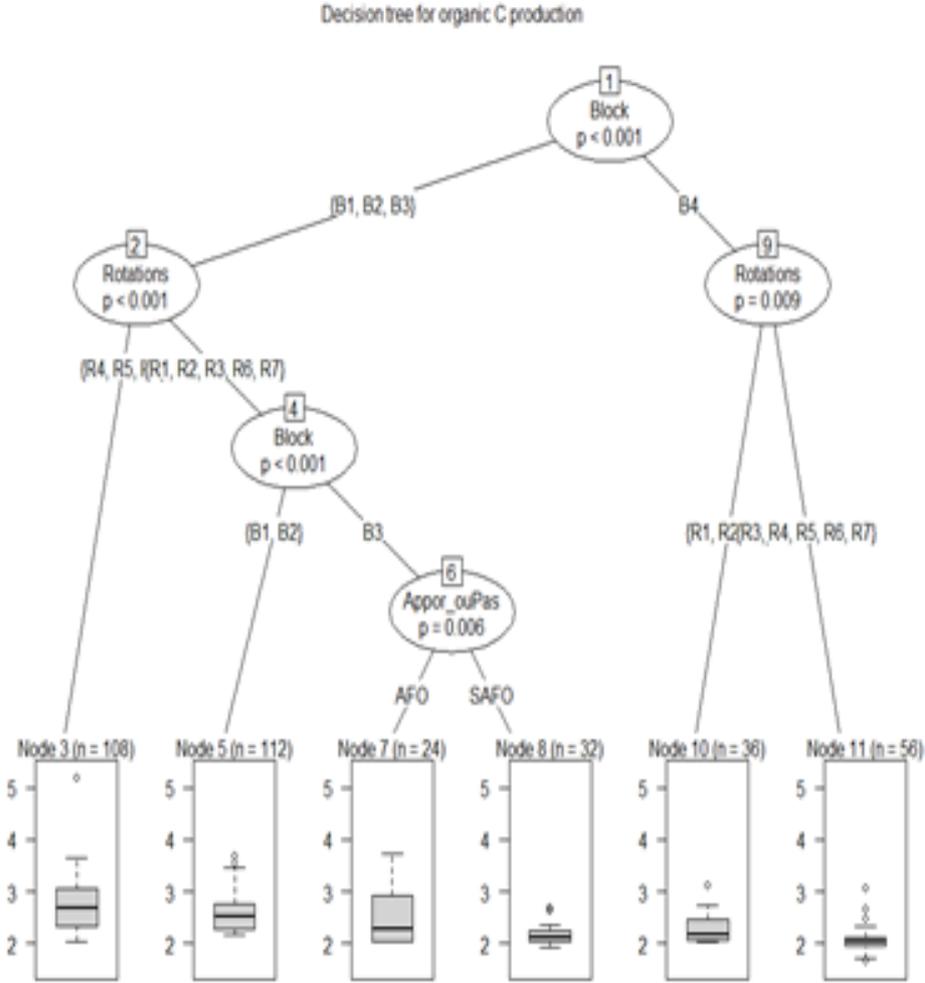


Figure 6 : Classification en arbre de décision (CART) des facteurs qui affectent la teneur en C-organique du sol

Tableau 28 : Variation (Δ) des principaux paramètres de fertilité chimique des sols

	Assolements / Fumure organique												
	JS-MS-AS		JS-AS-MS		AS-MS-AS		MS-AS-MS		MS-MS-MS		M-A-M	A-M-A	Mf-Mf-Mf
Paramètres chimiques	AFO [†]	SAFO	AFO [†]	SAFO	AFO [†]	SAFO	AFO [†]	SAFO	AFO [†]	SAFO	SAFO	SAFO	AFO ^{††}
$\Delta\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ (g.kg ⁻¹)	+0,09	-0,08	-0,01	-0,21	-0,07	-0,21	-0,23	-0,29	+0,05	-0,10	-0,21	-0,09	+0,22
$\Delta\text{C-organique}$ (g.kg ⁻¹)	+0,89	+0,31	+1,06	+0,27	+0,69	+0,17	+0,93	+0,47	+0,68	+0,53	+0,17	+0,38	+1,54
ΔAzote (g.kg ⁻¹)	-0,02	-0,08	+0,01	-0,06	-0,03	-0,08	-0,01	-0,10	+0,05	-0,11	-0,13	-0,09	-0,09
$\Delta\text{Phosphore}$ (mg/100g)	+2,76	+0,48	+1,00	+0,15	+2,12	+0,24	+0,23	+0,53	+1,37	+1,29	-0,27	-0,24	+2,52
$\Delta\text{Potassium}$ (mg/100g)	+3,84	-0,03	+4,48	-0,17	+1,13	+0,12	+2,50	-0,15	+1,84	+0,58	-0,01	-0,12	+5,65
$\Delta\text{Calcium}$ (mg/100g)	+5,30	+2,32	+2,41	+0,34	+9,15	+3,26	+3,06	+0,96	+14,57	+7,48	+2,01	+6,06	+10,90
$\Delta\text{Magnésium}$ (mg/100g)	+1,02	-0,49	+1,20	-0,12	+1,02	+0,43	+0,92	+0,18	+0,57	+0,12	+0,01	+0,50	+2,27

† Apports annuels de 10 tonnes de matières brutes en 2013 et 2014;

†† Apports annuels de 10 tonnes de matières brutes en 2012, 2013 et 2014.

Le bilan d'azote du sol a été globalement négatif dans tous les systèmes de culture SAFO : des baisses de 0,01 à 0,13 g.kg⁻¹ ont été observées (tableau 28) sur une teneur initiale moyenne de 0,24 g.kg⁻¹ (soient de 4 à 54%). Cette diminution de la teneur en azote a été particulièrement marquée au niveau des systèmes de culture qui totalisent au moins deux cycles de culture du mil sur les trois années, notamment MS-AS-MS, MS-MS-MS, M-A-M avec une baisse de 41,7%, 45, 8% 54,1% en valeur relative, respectivement. Pour les traitements en SCV avec AFO, la tendance a été généralement à l'équilibre de la teneur en azote du sol. Des différences hautement significatives ($p < 0,001$) de teneurs en azote ont été observées entre rotations culturales, notamment entre les systèmes en SCV, d'une part, et les STA, d'autre part. L'effet de l'AFO a été très significatif ($p < 0,001$) entre les traitements, particulièrement entre traitements des systèmes en SCV. Les teneurs d'azote du sol, meilleurs dans les traitements combinant SCV et AFO, semble montrer des synergies entre l'AFO et le maintien d'un couvert de stylosanthes sur le sol, particulièrement à la 3^{ème} année lorsque la production de biomasse de stylosanthes a été plus importante. Ceci s'est traduit par un équilibre de la teneur en azote au niveau des traitements en SCV avec AFO alors qu'une baisse moyenne de 35,8% est observée pour les traitements en SCV SAFO.

Les concentrations du sol en phosphore disponible initialement faibles (en moyenne 4,91 mg/100g) ont été relevés dans tous les traitements sauf ceux des rotations A-M-A et M-A-M (tableau 28). L'augmentation du niveau de P du sol a été obtenue principalement par l'AFO. Les effets de l'AFO ont été cumulatifs avec un effet bloc très significatif ($p < 0,001$), particulièrement dans les blocs 2, 3 et 4 (figure 7). Les systèmes de culture en SCV ont relativement contribué au maintien de l'équilibre du niveau de P du sol ou à son amélioration, en l'occurrence dans les traitements avec l'AFO. En moyenne, un relèvement de 30% (5 à 56%) du niveau de P par rapport à la situation initiale a été observé pour les systèmes en SCV avec AFO contre 11% (3 à 26%) pour les mêmes systèmes SAFO. Par contre, la concentration en P diminue inéluctablement dans des proportions de 5%, dans les traitements SAFO et sans aucune couverture du sol.

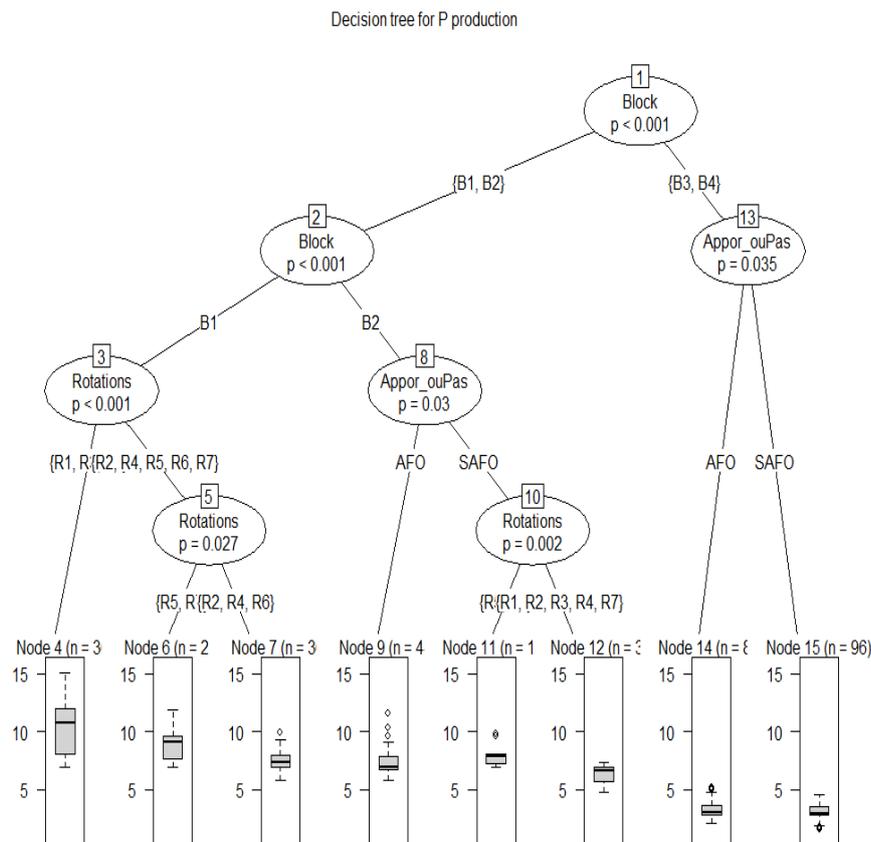


Figure 7 : Classification en arbre de décision (CART) des facteurs qui affectent le taux de phosphore du sol

L'évolution des teneurs en potassium (K), en calcium (Ca), en magnésium (Mg) montre une augmentation de ces nutriments dans le sol (tableau 28).

La concentration en K a augmenté de manière importante avec l'AFO : de 1,13 à 5,65 mg par 100 g de sol, soit entre 41,5 et 207,7%. En outre, les effets de la rotation sur la teneur en K ont été plus marqués avec l'AFO. Au niveau des traitements SAFO, la concentration en K du sol tend généralement à l'équilibre dans les systèmes de culture en SCV alors qu'une baisse de moins de 5% est observée dans les rotations traditionnelles (A-M-A et M-A-M).

La concentration en calcium a augmenté de 0,3 à 14,6 mg de CaCO₃ par 100 g de sol, soient des variations en valeur relative de 0,45 à 19,55%. L'effet de l'AFO a été significatif ($p < 0,001$), avec des gains de CaCO₃ de 6,9 mg et 2,9 mg par 100 g de sol entre les traitements avec AFO et SAFO des systèmes de culture en SCV. Une différence significative ($p < 0,001$) a été également observée entre les STA et ceux en SCV.

Les quantités de Mg du sol ont généralement augmenté ; seuls les traitements SAFO des rotations JS-MS-AS et JS-AS-MS ont montré une variation négative. L'augmentation s'établissait, en moyenne, de 0,9 mg (0,5 à 1,2) par 100g de sol dans les systèmes en SCV avec AFO contre 0,2 mg (0,1 à 0,4) pour ceux en SCV SAFO. Les quantités de Mg mesurées au niveau des rotations traditionnelles ont augmenté de 0,01mg, 0,5mg et 2,27mg par 100g de sol, respectivement pour M-A-M, A-M-A et Mf-Mf-Mf. L'effet significatif de l'AFO ($p < 0,001$) et de la rotation ($p < 0,05$) a été observé.

2. 3. 2. Equilibre chimique des nutriments

La fertilité chimique d'un sol résulte, en plus des teneurs en nutriments, d'un ensemble d'équilibres et d'interactions entre ceux-ci. Les équilibres entre les nutriments ont été appréciés à travers les rapports C/N, Mg/K et (Ca+Mg)/K. Les interactions et les dépendances ont été déterminées par une analyse en composantes principales (ACP).

L'étude montre un relèvement du rapport C/N dans tous les systèmes de culture : inférieur à 10 en début d'expérimentation, il était en moyenne de 12,7 pour les systèmes de culture en SCV avec AFO, de 16,7 pour ceux SAFO, de 21, 17 et 24,7 pour les STA (respectivement, M-A-M, A-M-A et Mf-Mf-Mf). Ces différences de rapports C/N ont été hautement significatives entre les traitements et, pour un même traitement, entre les années ($p < 0,001$). Elles sont liées principalement aux effets combinés de l'AFO et du type de couverture végétal du sol ($p < 0,05$), notamment dans les systèmes de culture de SCV. Les valeurs du ratio C/N ont été plus équilibrées dans les systèmes de culture en SCV, notamment avec l'AFO ($11 \leq C/N \leq 20$). Des valeurs particulièrement élevées du ratio C/N ont été obtenues à la dernière année, notamment dans les systèmes de culture A-M-A, M-A-M et Mf-Mf-Mf (26 à 34).

Les valeurs du rapport Mg/K ont été systématiquement inférieures à 2 dans les traitements avec AFO (sauf pour la rotation AS-MS-AS) et supérieures à 2 dans les traitements SAFO. L'équilibre global des minéraux Ca, Mg et K suit celle de Mg/K avec des valeurs du rapport (Ca+Mg)/K inférieures à 20 (entre 11 et 19) dans les traitements avec AFO (sauf pour la rotation AS-MS-AS) et supérieures à 20 (entre 28 et 33) dans les traitements SAFO. Il semble que la fumure organique affecte la balance des nutriments en faveur du calcium et du magnésium quelque soit le système de culture (SCV ou STA).

Les paramètres de fertilité chimique ont été analysés sous plusieurs formes. Les données montrent une importante variation de certaines propriétés chimiques du sol (CV > 35 %) qui pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité du terrain résultant des utilisations antérieures différentes et par la division et la fertilisation appliquées. Les effets des traitements sur la propriété chimique du sol ont été analysés à l'aide de modèles à effets mixtes linéaires, considérant la « répétition » des mesures et les facteurs aléatoires. L'analyse montre des interactions significatives entre les traitements et pH, C-organique, CEC, N, C/N, Mg, Ca ($p_value < 5\%$). Des corrélations importantes entre certains paramètres chimiques des sols ont été mises en évidence, notamment entre P et pH, P et Ca, C-organique et Mg, C-organique et K. La corrélation négative entre N et le rapport C/N s'explique par la mobilisation de l'N par les microorganismes du sol pour dégrader la matière organique lignifiée restituée au sol (tiges de mil).

L'analyse multivariée met en évidence trois composantes principales qui expliquent 77,7% de la variation observée. La composante 1 qui renferme 45% de l'information des propriétés chimiques du sol est déterminée principalement par la teneur en C-organique, les taux de K, de Ca, de Mg, de P et le pH (figure 8). La teneur en N et le rapport C/N affectent principalement la composante 2 qui expliquent 20% des propriétés chimiques. La composante 3 qui explique 12,7% de la variation est déterminée de façon marginale par les paramètres C-organique, Ca, P et le pH. En considérant les deux dimensions les plus explicatives, la projection des variables sur un cercle de corrélation (figure 9) montre que C-organique, Mg et Ca sont les principales variables de la composante 1 (Dim. 1) alors que N et C/N constituent les variables de la composante 2 (Dim. 2). En effet, les valeurs de \cos^2 de C-organique, Ca, P et le Mg sur l'axe 1 (respectivement, 0,726, 0,646, 0,612, 0,628) indiquent un poids important de représentativité de ces variables sur l'axe : d'où le positionnement du vecteur à proximité de la circonférence du cercle de corrélation. Sur l'axe 2, le \cos^2 de N et C/N (respectivement, 0,765 et 0,737) et la corrélation négative entre ces variables sont illustrés par leur position à proximité du cercle de corrélation et leurs sens opposés.

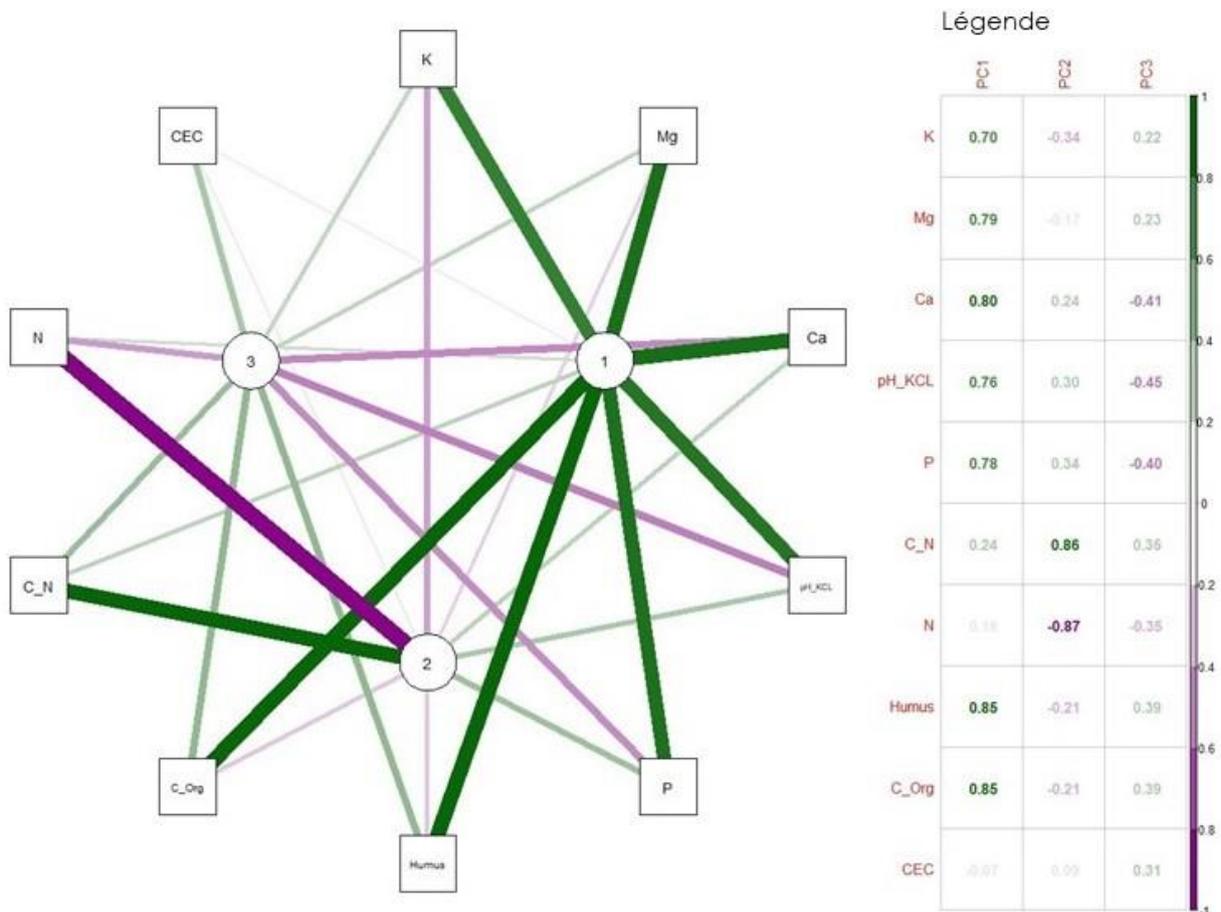


Figure 8 : Contribution des variables dans la construction des trois dimensions

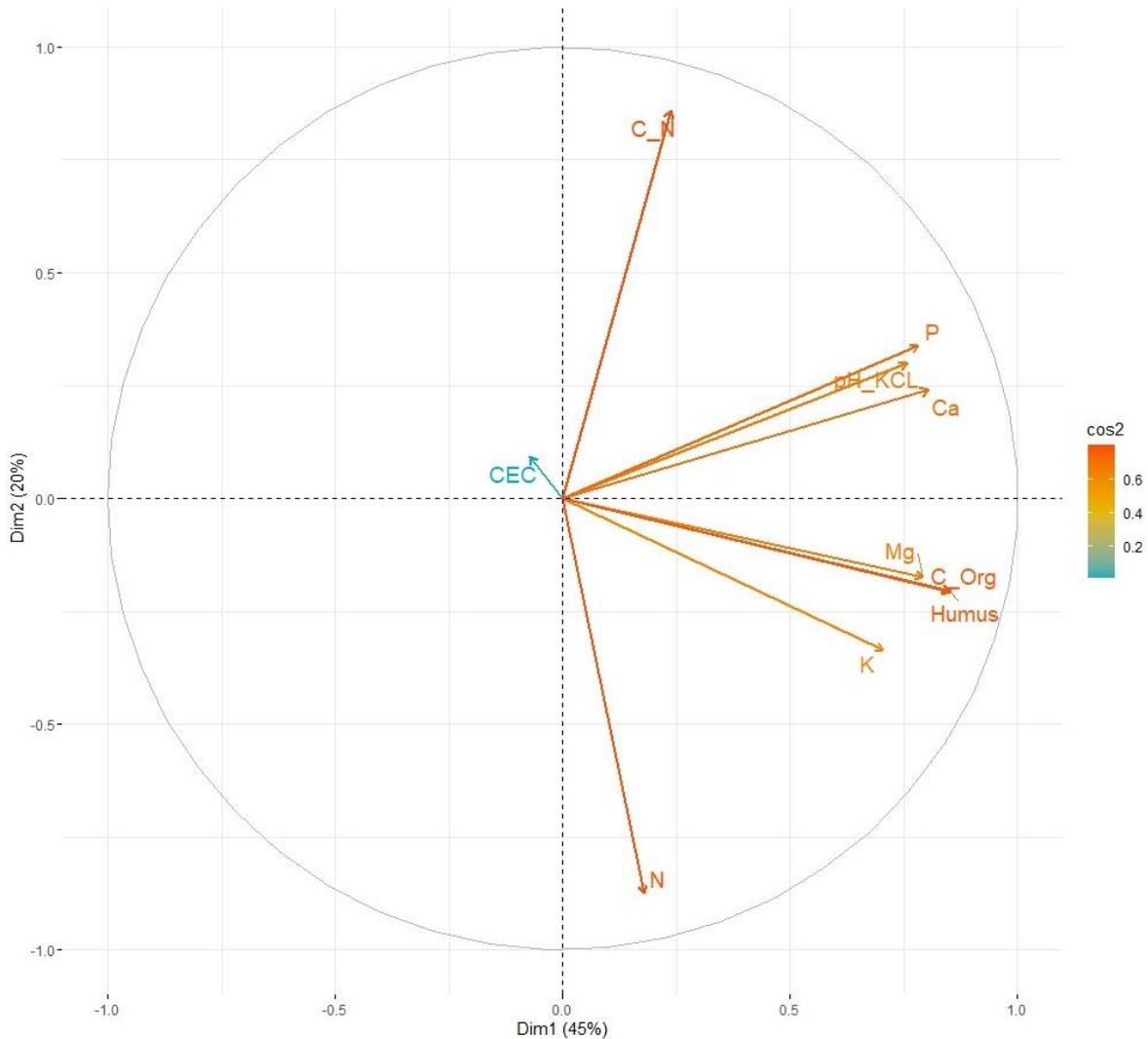
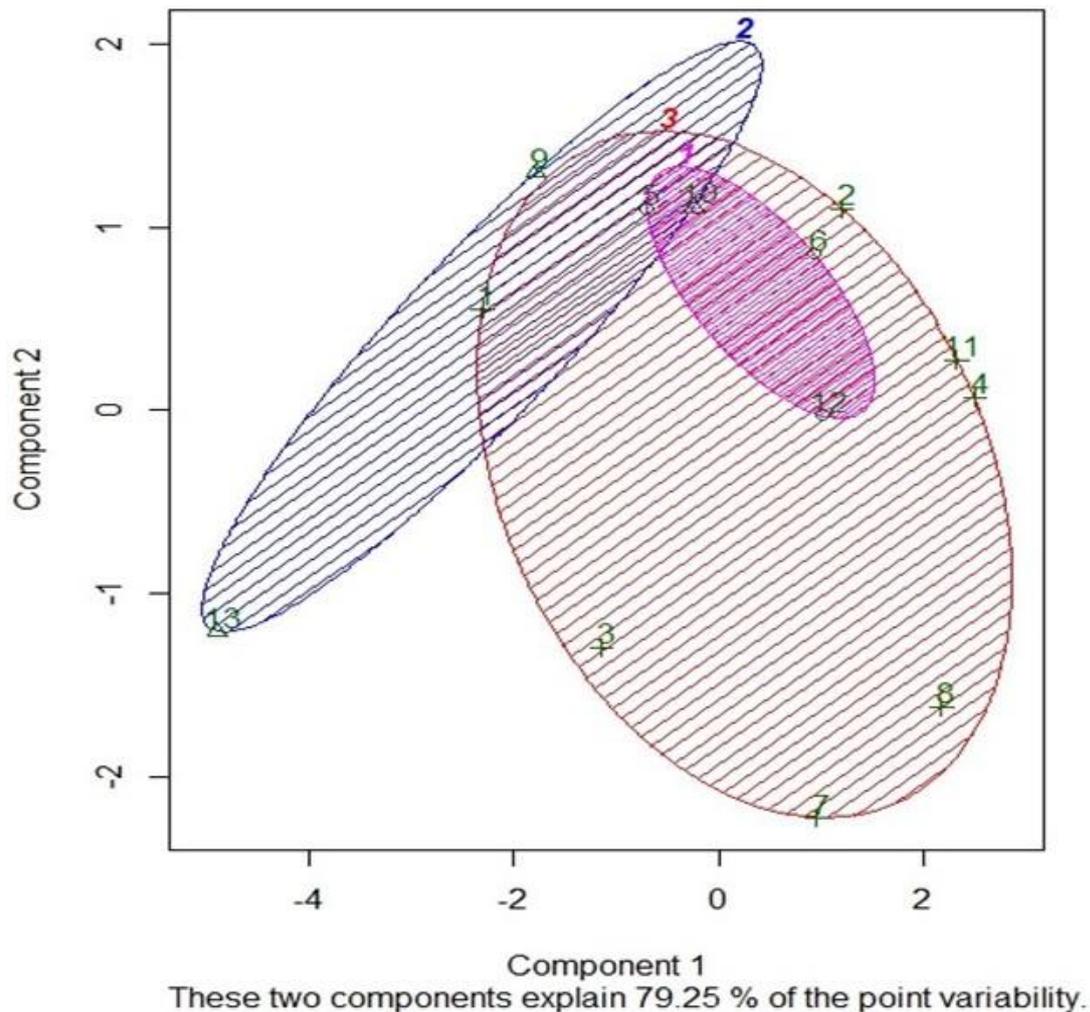


Figure 9 : Corrélation entre les variables majeures de fertilité chimique des sols dans l'ACP

La classification en trois groupes de sols, à partir de leurs propriétés chimiques, montre d'importantes différences entre les systèmes qui sont traduites par la distension des groupes (figure 10). Le groupe 1 constitué des systèmes AS-MS-AS avec AFO (5) ou SAFO (6), MS-MS-MS - SAFO (10) et A-M-A (12). Le groupe 2 est constitué des rotations JS-MS-AS (1), MS-MS-MS (9) et Mf-Mf-Mf (13), toutes recevant une fumure organique. Les traitements du groupe 2 sont ceux qui ont montré une augmentation de la valeur du pH au cours de l'expérimentation. Le groupe 3 est composé des systèmes JS-MS-AS, SAFO (2), JS-AS-MS, AFO (3), JS-AS-MS, SAFO (4) MS-AS-MS, AFO (7), MS-AS-MS, SAFO (8) et M-A-M, SAFO (11). Le traitement Mf-Mf-Mf (13) est déterminé par la composante 1 qui est, elle-même, constituée par les teneurs en C-organique, en Mg et en K.



Légende : 1 - JS-MS-AS, AFO; 2 - JS-MS-AS, SAFO; 3 - JS-AS-MS, AFO; 4 - JS-AS-MS, SAFO; 5 - AS-MS-AS, AFO; 6 - AS-MS-AS, SAFO; 7 - MS-AS-MS, AFO; 8 - MS-AS-MS, SAFO; 9 - MS-MS-MS, AFO; 10 - MS-MS-MS, SAFO; 11 - M-A-M, SAFO; 12 - A-M-A, SAFO; 13 - Mf-Mf-Mf, AFO.

Figure 10 : Classification des sols des traitements en trois groupes

IV. 3. Discussion

Les performances de production enregistrées durant ces expériences ne montrent pas une amélioration des rendements avec le SCV comparé aux systèmes traditionnels. Les services pédologiques et écologiques qui peuvent soutenir une amélioration progressive des performances de production en AC sont obtenus dans le long terme. L'intérêt du SCV, à court terme, réside de la diversification de la production et le développement de synergies, avec le défi de maintenir les rendements au niveau des systèmes traditionnels Cet enjeu n'est pas assuré surtout que les productions d'arachide et de mil sont négativement corrélées avec la biomasse végétale de *S. hamata*. Dans les conditions d'expérimentation, la légumineuse de couverture concurrence la culture principale entraînant une diminution modérée de la production, en première année, à très importante (jusqu'à 90%) les années ultérieures. Les effets de cette concurrence sont plus marqués chez l'arachide du fait de leur appartenance à la même famille (Fabacée) qui induit des similitudes de besoins mais aussi de la colonisation du même espace (compétition pour la lumière). Cependant, l'association *S. hamata* – arachide à la première année favorise une meilleure installation du stylosanthes à travers la mesure des indicateurs de hauteur, de ramifications et production de biomasse de la plante. Le ressemis naturels de *S. hamata*, à la 2^{ème} année, a été meilleur dans cette association, laissant présager une production plus importante de semences. L'installation de stylosanthes en association avec l'arachide serait

favorisée par une nodulation plus précoce et une meilleure activité des nodules formées (Sungthongwises et al., 2011). Chez le mil, l'AFO pourrait dissiper les effets de la concurrence de *S. hamata* sur la production de grains. Cette solution semble être conditionnée par un apport hydrique satisfaisant qui permette un niveau d'utilisation élevé des nutriments apportés par la fumure organique. Cette réponse du mil à la fumure organique se manifeste à travers la production de grains sans affecter la production de tiges. Dans les associations *S. hamata* – arachide, la réponse du stylosanthes à la fumure organique a été meilleure que celle de l'arachide exacerbant davantage la concurrence. Ceci explique la diminution du rendement en gousses dans les systèmes en SCV, avec l'AFO. Le recépage de la biomasse végétative est, dans une certaine mesure, efficace pour limiter les effets de la concurrence du Stylo sur les rendements en gousses et en grains. Il permet également d'améliorer la production totale de biomasse de *S. hamata* et la qualité nutritive du fourrage. En effet, tous les paramètres de qualité fourragère (digestibilité, teneur en nutriments, etc.) sont améliorés avec le recépage. Les fourrages plus jeunes et les repousses sont moins lignifiés, plus digestibles, plus riches en azote, etc. Cette technologie pourrait constituer, avec l'AFO, la clé du développement des systèmes de culture en SCV dans le bassin arachidier du Sénégal.

La fumure organique est une des pratiques agroécologiques pouvant garantir la durabilité des systèmes de culture en SCV. Elle est indiquée pour prévenir les pertes de fertilité des sols liées au mode d'exploitation en continue, conjugué avec l'exportation de toute la biomasse aérienne produite (Koulibaly et al., 2010; Groot et al., 1998). L'AFO stimule la structure, l'activité biologique et la capacité de rétention (eau et minéraux) du sol permettant d'augmenter et de stabiliser les productions (Nicholls. and Altieri., 2018). Les effets de la fumure organique et des technologies d'AC sur l'évolution des indicateurs de fertilité chimique du sol ont été très variables et déterminent le potentiel de chaque pratique ou ensemble de pratiques pour maintenir (voire améliorer) la qualité des sols.

Les quantités de matières organiques restituées au sol dépendent de la pratique de la fumure organique, de la fréquence de la culture du mil et de la présence de stylosanthes dans la rotation. La restitution partielle (stylosanthes) et/ou totale (tiges de mil) de la biomasse permet, à elle seule, des gains de C-organique du sol. Ces résultats s'accordent avec ceux de Razafimbelo et al. (2006) qui ont montré une augmentation du stock de matière organique de l'horizon de surface (0 -20 cm) par la couverture du sol par une légumineuse et/ou la restitution des résidus de cultures. Cependant, la fumure organique est le meilleur moyen pour améliorer la teneur en matière organique du sol, avec une augmentation moyenne de 39% sur 3 ans pour les traitements en SCV avec AFO contre 16% pour ceux SAFO. En outre, il est logique d'admettre qu'une partie du C-organique accumulé a été favorisé par le ralentissement du processus de minéralisation de la matière organique en l'absence de labour (Johansen et al., 2012, Chivenge et al., 2007). L'AFO a permis souvent de limiter la diminution du pH du sol et, dans certains cas, de le maintenir à sa valeur initiale. La diminution systématique du pH du sol dans les systèmes en SCV ou STA est établie par plusieurs travaux (Dominguez et al., 2010; Fernandes et al., 2000).

Les pertes d'azote observées correspondent à ceux établis au Sénégal, par Waneukem et Ganry (1992), pour des systèmes de culture SAFO ou avec un apport important de matière organique lignifiée (tiges de céréales). Les effets cumulatifs de la restitution fréquente des tiges de mil au sol et de l'absence de fumure organique sur les pertes d'azote pourraient s'expliquer par son immobilisation par les microorganismes pour décomposer la matière organique végétale (Badiane et al., 1999). La baisse du niveau d'azote dans les systèmes en SCV semble être partiellement compensée par les apports de la légumineuse de couverture sous formes foliaires et de fixation symbiotique (Zahran, 1999). Les synergies entre l'AFO et l'utilisation d'une légumineuse de couverture se traduisent par le maintien à l'équilibre du niveau d'azote des traitements en SCV avec AFO alors qu'une baisse moyenne de 35,8% a été mesurée dans les traitements en SCV SAFO. Le mécanisme de cette synergie a été décrit par Bado (2002) qui a établi un lien entre l'apport de nutriments par la fumure organique, notamment le phosphore, et l'amélioration de la fixation symbiotique à travers l'augmentation de la nodulation et de l'activité des rhizobiums.

Un meilleur équilibre fonctionnel des nutriments est obtenu avec les traitements en SCV avec AFO. Les rapports C/N obtenus pour ces traitements ($11 \leq C/N \leq 20$) sont révélateurs d'une bonne évolution de la matière organique. Les valeurs très élevées du ratio C/N (supérieure à 30) qui traduisent un

déficit d'azote par rapport au C-organique sont liées à la restitution fréquente des tiges de mil très lignifiées. Toutefois, dans les conditions tropicales caractérisées par une faible teneur en matière organique du sol toute amélioration du statut organique du sol essentiel même si le rapport C/N est élevé. La balance des ions calcium, magnésium et potassium est fortement influencée par la fumure organique. Les valeurs des rapports Mg/K et (Ca + Mg)/K dans les traitements avec AFO sont généralement inférieures au seuil minimal de 2 pour Mg/K et 15 pour (Ca + Mg)/K, indiqué par Boyer (1978) pour des sols tropicaux. Toutefois, le fonctionnement de ces équilibres est plus complexe; il est sous la dépendance de plusieurs facteurs dont la teneur en particules fine (argile et limon) du sol. Par ailleurs, une variabilité du rapport [(Ca+Mg)/K], comprise entre 15 et 30, semble convenable pour une large diversité de plantes et de conditions culture (Boyer, 1978). Globalement, les systèmes de culture testés permettent d'améliorer ou de maintenir la plupart des indicateurs de fertilité chimique du sol. Les effets du recépage sur l'évolution de la fertilité pourraient être mieux caractérisés par une étude de son application sur plusieurs années.

Conclusion

La durabilité des systèmes de production s'apprécie principalement à deux niveaux: la productivité et la préservation (voire l'amélioration) des capacités de production des ressources. Dans les conditions d'expérimentation, la productivité des systèmes de culture en SCV a été très variable, dépendant principalement de la pluviométrie, de la fertilité du sol et des formes d'associations de cultures. L'effet du SCV sur la production de la culture principale tend vers la neutralité en première année du fait de la lente installation de *S. hamata*. La diminution des performances de production observée les années suivantes pourrait être évitée, au moins en partie, avec l'application de la fumure organique et du recépage de la biomasse végétale. Les effets immédiats des pratiques agroécologiques testées se rapportent à la gestion de la fertilité des sols et la production de fourrage de qualité, surtout avec le recépage. La combinaison de la fumure organique avec les technologies d'AC donnent les meilleurs équilibres des nutriments. Cependant, la restitution fréquente des tiges mil appliquée sans une fumure organique augmente le niveau de C-organique tout en créant déséquilibre par rapport à l'azote. Ces avantages écologiques des systèmes de cultures en semis direct SCV de *S. hamata* et de l'influence des pratiques de gestion de la biomasse de couverture sur les performances de production nécessitent d'être affirmés par des études supplémentaires.

Chapitre V

Effect of management practices for *Stylosanthes hamata* (L.) Taub. biomass cover on the weed species in different direct-seeding, mulch-based cropping systems. *Weed Biology and Management* (2018): 1-13

Chapitre V

Effets des pratiques de gestion de la biomasse de couverture à *Stylosanthes hamata* (L.) Taub. sur les espèces d'adventices des systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal. *Weed Biology and Management* (2018): 1-13

Unlike other farming conditions (Europe, America, etc.), in sub-Saharan Africa, small farmers do not have sufficient capacity to invest in the acquisition of inputs (fertilizer, pesticides, etc.) to intensify their production. For these farmers, agroecological practices such as direct seeding in cover crops possibly are the only way (technical, economic, environmental) to support crop growth and preserve productive resources. One of the major constraints of direct seeding cropping systems (DSS) is the invasion of weeds. The development and adoption of DSS is strongly linked to weed management. This chapter studies the floristic composition associated with DSS, the level of weediness and tests the effectiveness of coppicing as a means of integrated management of crops with *S. hamata* as cover crop in the peanut production area of Senegal. The effectiveness and limitations of these measures to manage weeds to tolerable level are discussed at length in this section.

Abstract

Weed management is a major challenge for smallholders' adoption of conservation agriculture techniques. The phytological composition and weed biomass in five direct-seeding cropping systems based on the millet–groundnut rotation, with permanent cover provided by *Stylosanthes hamata* (L.) Taub., were evaluated after 3 years in western Senegal. A transect was used to determine the phytological composition. The weed biomass was measured in five quadrats in the middle and at the end of the plant growth cycle. This study shows that *S. hamata* ground cover does not allow the effective control of weeds; high weed infestation was recorded in all direct-seeding cropping systems (58–75% of the ground cover). A high diversity of weed species was observed in all treatments, dominated by *Eragrostis* ssp. and *Dactyloctenium aegyptium* Beauv. Cutting back and removing the aboveground biomass reduced the ground cover provided by *S. hamata*, lowered the weed species diversity and favored heliophilous species such as *Eragrostis tremula* but did not reduce weed infestation. Animal manure application did not, in the short term, affect the composition or structure of the weed species. However, it favored weed development and increased aboveground biomass. In the long term, this could affect weed seedbank and structure. Cutting back and removing the aboveground biomass of *S. hamata* resulted in lower weed diversity and higher crop yield. To achieve effective weed control, additional research on management techniques that would focus on the combination of cutting back vegetation and weeding along the crop seeding line will be needed.

Keywords: biomass, direct-seeding mulch, phytological composition, *Stylosanthes hamata*, weeds.

Résumé

La gestion des adventices est un défi majeur pour l'adoption des technologies d'agriculture de conservation par les exploitations agricoles familiales. La phytosociologie et la biomasse des adventices ont été étudiées après 3 ans de culture, dans cinq systèmes de semis direct sous couvert de *Stylosanthes hamata* (L.) Taub et la rotation mil-arachide. La méthode du transect a été utilisée pour déterminer la flore adventice. La biomasse a été mesurée dans cinq quadrats au milieu et à la fin du cycle de croissance des plantes. L'étude montre que le couvert végétal de *S. hamata* ne permet pas de contrôler efficacement l'enherbement. Un niveau élevé d'infestation par les adventices a été enregistré dans tous les systèmes de culture en semis direct (58–75% du couvert végétal). Une grande diversité des espèces adventices a été observée dans tous les traitements, dominée par *Eragrostis* ssp. et *Dactyloctenium aegyptium* Beauv. Le recépage et l'exportation hors champ de la biomasse aérienne réduisent le couvert végétal de *S. hamata* et la diversité des espèces adventices en favorisant l'abondance d'espèces héliophiles telles qu'*Eragrostis tremula* sans pour autant affecter le niveau d'enherbement. L'application de la fumure organique n'a pas d'effets, à court terme, sur la composition ou la structure des espèces de mauvaises herbes. Cependant, elle favorise le développement des adventices et la production de biomasse aérienne. À long terme, cela pourrait affecter le stock de semences dans le sol et la structure de la flore adventice. De meilleurs rendements des cultures sont obtenus avec le recépage et l'exportation de la biomasse aérienne. Pour aboutir à un contrôle efficace des adventices, des recherches supplémentaires sur les techniques de gestion de la biomasse axées sur la combinaison du recépage de la végétation et le sarclage dans la ligne de semis des cultures seront nécessaires.

Mots clés: Biomasse, semis sous couvert végétal, Composition phytosociologique, *Stylosanthes hamata*, adventices

Introduction

In sub-Saharan Africa, agriculture is facing several challenges related to production, the environment and the economy. Labor-intensive production systems with low input levels, using little fertilizer and/or phytosanitary treatments, predominate in these regions. But as a result of the soil exhaustion caused by the elimination of the fallow, these systems are no longer able to meet the population food requirements. To reverse this trend and enhance soil fertility and improve crop productivity, conservation agriculture (CA) is often promoted (Ito et al., 2007; Valbuena et al., 2012; Corbeels et al., 2014). Direct-seeding and no-tillage cropping systems are being developed to sustainably improve crop productivity and soil fertility (Odunze, 2002; Razafimbelo et al., 2006; Saito et al., 2010). These systems offer several advantages: they are less time consuming, require less arduous work, reduce weeding and improve crop yields (Odunze, 2002; Salako & Tian, 2003). Conventional tillage contributes to soil degradation, particularly in tropical environments, by promoting the oxidation of organic matter (Johansen et al., 2012). However, tillage reduction or elimination is generally accompanied by increased diversity and higher levels of weed infestation in the absence of herbicide treatments (Zanin et al., 1997; Légère et al., 2005; Chauvel et al., 2011). In many cropping systems, ploughing is a weed control method (Ekeleme et al., 2005; Gruber & Claupein, 2009). It buries weed seeds that are otherwise found on the surface. The evaluation of the weed seeds stock in the soil surface layer (<5 cm) by Mulugeta and Stoltenberg (1997) and Swanton et al. (2000) showed a greater amount of weed seeds in direct-seeding systems than in CA systems. Hani and Nawal (2005) even recommend deep ploughing in order to dispose of viable weed seeds. They lose their germination ability after being buried for a long period, particularly if they are low dormancy seeds (Gruber & Claupein, 2009). Burying seeds deep underground also prevents the germination of heliophilous species (Noba, 2002).

Weed management is a major challenge to the adoption of CA by smallholders. The reduction or elimination of ploughing must often be accompanied by an increase in the use of herbicides (Zanin et al., 1997; Ito et al., 2007; Johansen et al., 2012; Muoni et al., 2013). However, in sub-Saharan Africa, the low investment capacity of smallholders (Corbeels et al., 2014) and technical expertise required for the use of herbicides (Johansen et al., 2012) hinder the spread and adoption of chemical-based weeding techniques. Therefore, the adoption of CA technologies depends greatly on the farmers' weed control ability. Knowledge of weed population is important with regard to evaluating how much harm they can cause and to limiting their damaging effects on the crops. For this purpose, the weed floras associated with different millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) and/or groundnut (*Arachis hypogaea* L.) cropping systems, intercropping with *Stylosanthes hamata* (L.) Taub., have been studied. Millet and groundnut are the main crops grown in Senegal, and even throughout sub-Saharan Africa. *S. hamata* is an annual herbaceous plant of the Fabaceae family. It is used in many mixed crop–livestock systems as a cover crop and fodder. An intercropping system that will allow crop and forage production while maintaining soil fertility will present a considerable appeal to smallholders. However, for the adoption of that system, effective management techniques for weed control will have to be devised.

To design sustainable cropping systems through soil fertility and weed infestation management, an efficient and diversified production experiment based on several management approaches (crop rotation, intercropping, mulching, animal manure application and mowing aboveground biomass) was carried out over 3 years. This paper shows the results aiming to evaluate the diversity of weeds and the pressure they exert on different direct-seeded cropping systems under the permanent cover of *S. hamata* based on the traditional millet–groundnut rotation practiced throughout the Senegalese Groundnut Basin.

V. 1. Materials and methods

1. 1. Experimental site

The experiment was carried out on the experimental farm of the “École Nationale Supérieure d'Agriculture (ENSA)” in Thies (14_450 lat. North; 16_530 long. West) in Senegal. The site is influenced by the Sahelo-Sudanian climate. The rainy season ranges from July to October. The annual

rainfall recorded in 2012, 2013 and 2014 was, respectively, 767 mm, 603 mm and 331 mm. The soil texture is sandy with low organic matter content (1.53–1.84% C). A particle size analysis of the arable layer (<20 cm) indicates percentages of 89–91% sand, 5–6% lime and 4–5% clay. The Cation Exchange Capacity is between 2.09 and 2.16 meq 100 g⁻¹; the pH water ranged from 7.3 to 7.9, and the pH KCl was between 6.7 and 7.5.

1. 2. Treatments and experimental design

The experiment started in July 2012 and lasted 3 years. It focused on a comparison of five direct-seeding mulch-based cropping systems including *S. hamata* as a companion cover crop for the two main crops grown in rotation in Senegal: (i) *S. hamata* fallow in the first year, millet intercropped with *S. hamata* in the second year and groundnut in intercropped with *S. hamata* in the third year (SF-MS-GS); (ii) SF-GS-MS; (iii) GS-MS-GS; (iv) MS-GS-MS; and (v) the MS-MS-MS rotation. The plots were divided into two from the second year onward to test the effect of manure application: (i) a subplot without application of manure (WAM); and (ii) a subplot with the application of manure (AM) at a dose of 10 tons ha⁻¹ of raw material following the recommendations of Fernandes et al. (2000) for sandy soil in the area in the form of dried cow manure. Two methods for managing biomass cover were tested in the third year at the subplot level: (i) cutting back and removing *S. hamata* and weed biomass 60 days after sowing the millet and groundnut; and (ii) no cutting back or removal of cover or weeds before the millet or groundnut was harvested. The different manures used in the second and third years had respective pH values of 7.62 and 7.73, and the chemical compositions for years 2 and 3, respectively, were: humidity (27.31 and 28.75%), total ash (36.45 and 48.28% of dry matter - DM), C (30.93 and 26.24% of DM), N (2.44 and 1.64% of DM), Ca (6.02 and 4.25 g kg⁻¹ of DM), Mg (2.47 and 0.24 g kg⁻¹ of DM) and P (111 and 132 g kg⁻¹ of DM). The 20 compared treatments were set up in the field using a randomized complete block design with split plots. There were four replicates per treatment. Each experimental unit had an area of 60 m² (6 m × 10 m). All the crops were sown using a dibber after tilling with a disc plough to a depth of 20 cm in the first year and directly beneath the plant cover in the following years. The plant cover used as mulch consisted of *S. hamata* biomass and millet crop residues produced at the site. All *S. hamata* biomass produced in the first year was used to create the mulch (between 187 and 1167 kg ha⁻¹), some of which was combined with millet stems (between 1680 and 2031 kg ha⁻¹). From the second year on, only one third of the *S. hamata* biomass produced was left on the ground as litter along with all the millet residues. The quantities left as litter after the second year of cultivation are displayed in Table 1. The ground cover (C) of the litter was estimated based on formula (1) (Scopel et al., 1999; Teasdale & Mohler, 2000; Naudin et al., 2011):

$$(1) C = 1 - \exp(-Am \times M)$$

Where C denotes the cover rate (as a percentage), *Am* is the surface/mass ratio (*Am* = 0.377 for *S. hamata* and *Am* = 0.367 for millet stems), and *M* is the mulch biomass (in tons).

Manual weeding occurred each year 15–21 days after sowing. To create satisfactory soil moisture conditions for *S. hamata*, which requires between 700 and 900 mm of rainfall per year, 150 mm (2012 and 2013) or 180 mm (2014) of water was divided into eight irrigation doses and applied over 28 days at the beginning of the cultivation period based on the delayed onset of the rainy season and/or rainfall frequency. The yield of the main crop was measured at harvest by weighing all the plot production.

1. 3. Data collection and processing

The determination of *S. hamata* cover and identification of weed species were carried out according to the quadrat method in the third year of the rotation and at the end of the crops' vegetative cycle (in November). A transect was marked using measuring tape, which extended diagonally across the subplot. Observations were carried out every 20 cm. At each point of observation, the identity of the plant species under the line of sight and the number of contacts, which indicates the number of intersections of an aboveground organ of the species with the line of sight, were recorded.

The phytological parameters were determined based on these data (Daget & Poissonet, 1974):

- the frequency (Fi), which provides information about the coverage of a species (i) and is the ratio, expressed as a percentage of the number of times a species was observed to the total number of observation points;

- the specific contribution (SC) is the ratio, expressed as a percentage, of the frequency (Fi) of the species to the total sum of the frequencies (ΣF_i) of all the species, and it refers to the contribution of the species in the covering of the ground;
- the specific contact contribution (SCC) is the ratio, expressed as a percentage, of the number of contacts for a given species to the sum of contacts for all the species; the SCC expresses the contribution of the species to the aboveground plant biovolume.

The structure of the flora was analyzed in each replicate using the Shannon-Weiner diversity index (H) and the Shannon equitability (or frequency) index (E). The diversity index, obtained using formula (2) and expressed in bits, ranges from 0 to 5 according to the diversity level. Evaluating equitability helps to detect changes in the structure of plant communities that are due to treatments. The equitability index, obtained using formula (3), ranges from 0 to 1; it indicates that a species is dominant if its value is close to 0 or the relatively balanced presence of several species if it is closer to 1.

$$(2) H = - \sum SC_i \cdot \text{Log}_2(SC_i)$$

$$(3) E = H / \text{Log}_2(S)$$

SC_i - specific contribution (SC) of species i;

S - the number of species in the plant community.

The contribution of species to the biovolume is based on their SCC. The determination of this value provides an index for the production of each herbaceous species.

The aboveground biomass was estimated by harvesting the biomass in five 1 m² quadrats randomly distributed across the subplot. Sorting occurred to separate the *S. hamata* biomass from that of the weed species, which were considered to be part of the same group. Two cross-sectional samples were taken, one in September and one between November and December. The first cross-sectional sample was intended to evaluate the effects of cutting and removal on the behavior of the crops and weed species. The final cross-sectional sample was taken after the weed species were identified, and it enabled the measurement of the total biomass.

Principal component analysis (PCA) and analysis of variance (ANOVA) were carried out on the specific frequencies of the species to evaluate their phytosociological behavior using Statistical Analysis Software (SAS). Tukey's HSD (Honestly Significant Difference) test enabled the comparison of averages of the different treatments. A Pearson adjustment test (chi squared test – χ^2) was carried out to compare the distribution of weed species among treatments.

V. 2. Results

2. 1. Ground cover provided by litter and *S. hamata* vegetation

The ground cover provided by litter after 3 years was low in all the rotations. Cover rates of 5.3 and 13.9% were estimated, respectively, for the MS-MS-MS and SF-GS-MS rotation plots, with mulch consisting solely of *S. hamata*. In the other rotations, the amount of ground cover provided by the litter (millet stems and *S. hamata* biomass) ranged between 41.3 and 51.6% (Tableau 29). In the MS plots, millet stems provided 30–37% of the cover, whereas *S. hamata* biomass contributed between 5 and 18%.

Tableau 29 : Estimated quantity of litter (kg ha⁻¹) and cover rate (%) obtained using one-third of the *S. hamata* biomass and all the millet stems produced after the second year of cultivation

Parameter		Crop rotations				
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS
Quantity of mulch	<i>S. hamata</i>	320.10	398.25	527.20	143.20	304.90
	Millet stem†	1269.40	0.00	1114.40	0.00	987.30
Cover rate	<i>S. hamata</i>	11.36	13.93	18.02	5.25	10.86
	Millet stem†	37.23	0.00	33.56	0.00	30.39
	Total	48.60	13.93	51.58	5.25	41.25

† – Full millet stem (with leaves)

The cover provided by *S. hamata* vegetation remained high in all crop combinations, with cover rates of 84.3–93.3% after 3 years (Tableau 30). The ANOVA did not show any difference in the cover provided by *S. hamata* (Tableau 30) linked to the crop rotation ($P > 0.05$). However, planting *S. hamata* in combination with another crop seems to provide better cover and more consistent vegetation. Cutting back the aboveground biomass during growing season influenced the ground cover ($P < 0.05$) at the end of the cycle in the SF-MS-GS, SF-GS-MS and GS-MS-GS rotations. Ground cover provided by *S. hamata* was reduced by 8–19% by mowing in all the treatments.

The contribution of *S. hamata* to the biovolume was highly variable (Tableau 31). Cropping systems with *S. hamata* planted as improved fallow in the first year (SF-MS-GS and SF-GS-MS) made the lowest contributions to the biovolume during the third year (45.3 and 46.9%) ($P < 0.05$). The values obtained with these cropping systems were not different from those obtained for MS-GS-MS (40.3%). The contribution of *S. hamata* to the biovolume was higher for GS-MS-GS (55.4%) and MS-MS-MS (57.5%). These differences among treatments persisted even when the biomass was cut back during the vegetative period. However, the contribution of *S. hamata* to the biovolume was therefore 22–32% lower depending on the rotation.

2. 2. Floristic composition

The weed flora was represented by 32 species belonging to 10 families. Grasses (Poaceae) and Fabaceae were the most represented, with 11 and 8 species, respectively. The other families were represented by one or two species (Tableau 32). These species were essentially therophytes, with the exception of *Cyperus rotundus* L. (Cyperaceae), which is a geophyte. As there was no clear difference in weed composition associated with animal manure application ($p\{\chi^2 > \chi^2(\alpha, 124)\} = 0.2$), this factor is not shown in Tables (“Tableau” 32 and 33).

Tableau 30 : Vegetative soil cover by *S. hamata* (%) measured at the end of the third year of cultivation in crop rotations according to the applied treatments

Fertilisation	Cutting back	Crop rotations					Average
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS	
AM	Cut back	75.00 ±14,57 b	83.00 ±8,17 b	85.50 ±5,59 b	80.00 ±5,20 b	87.00 ±12,59 a	82.10
	Uncut	93.50 ±7,06 a	95.50 ±3,15 a	99.00 ±1,05 a	92.00 ±8,33 a	99.50 ±0,75 a	95.90
WAM	Cut back	74.50 ±12,89 b	85.00 ±9,33 b	86.00 ±6,12 b	81.50 ±6,42 b	87.50 ±11,31 a	82.90
	Uncut	94.00 ±5,82 a	93.50 ±5,23 a	98.50 ±1,97 a	90.50 ±8,57 a	99.00 ±0,92 a	95.10
Average		84.25*	89.25*	92.25*	86.00*	93.25^{NS}	

* Significant difference ($p < 0.05$) between treatments; NS, no significant difference;
Values with different letters within differ significantly.

Tableau 31 : Contribution (%) of *S. hamata* to the biovolume of the vegetation at the end of the cycle

Fertilisation	Cutting back	Crop rotations					Average
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS	
AM	Cut back	34.04 ±6.37 bA	38.97 ±13.23 bA	40.27 ±4.02 bA	29.06 ±9.38 bA	44.63 ±11.01 bA	37.39^{NS}
	Uncut	52.74 ±9.41 aA	55.02 ±13.65 aA	67.96 ±12.75 aA	49.36 ±11.52 aA	69.79 ±9.37 aA	58.97^{NS}
WAM	Cut back	28.53 ±5.88 bA	35.40 ±12.68 bA	39.51 ±4.16 bA	28.27 ±9.12 bA	38.08 ±9.75 bA	33.96^{NS}
	Uncut	56.83 ±10.53 aB	57.86 ±13.89 aAB	73.81 ±12.17 aA	54.52 ±12.37 aB	77.63 ±12.72 aA	64.13*
Average		43.03**	46.81*	55.39**	40.30*	57.53**	

*Significant difference ($p < 0.05$) between treatments;

**Very significant difference ($p < 0.01$) between treatments; NS, no significant difference;

Values with different lower-case letters within a column differ significantly; Values with different capital letters within a row differ significantly.

Tableau 32 : Frequency of weed species combined with *S. hamata* vegetation in cut back (CB) and uncut (UC) plots

Families	Species	Life forms	SF-MS-GS		SF-GS-MS		GS-MS-GS		MS-GS-MS		MS-MS-MS	
			CB	UC								
	<i>Cenchrus biflorus</i> Roxb.	T	1.00	1.00		0.50	0.50			2.00	2.50	2.00
	<i>Chloris pilosa</i> Schumacher	T				1.50	2.50		0.50	0.50	2.50	1.50
	<i>Chloris prierurii</i> Kunth	T	0.50	0.50	4.00	5.00	0.50			1.50	1.50	1.00
	<i>Dactyloctenium aegyptium</i> Beauv.	T	14.50	29.50	17.50	31.50	17.00	12.50	23.50	42.50	11.00	22.00
	<i>Digitaria ciliaris</i> (Retz.) Koeler	T	27.00	39.50	18.50	36.50	19.00	15.00	13.50	40.50	22.00	29.50
Poaceae	<i>Digitaria fuscescens</i> (J. Presl) Henr.	T	2.50		1.00	1.00					2.00	
	<i>Digitaria horizontalis</i> Willd.	T	11.00	11.50	6.00	35.00	4.50	25.00	3.00	34.50	3.50	17.00
	<i>Eragrostis ciliaris</i> (Linnaeus) R. Brown	T	38.50	27.00	17.50	13.50	34.00	11.50	25.50	9.00	34.50	12.00
	<i>Eragrostis tenella</i> (L.) P.Beauv. ex Roem. & Schult.	T	8.50	4.50	9.00	1.50	1.50	8.50	1.00		8.50	2.00
	<i>Eragrostis tremula</i> (Lam.) Hoch. ex Steud.	T	71.50	46.00	76.00	25.00	54.50	27.50	86.50	48.00	70.00	22.00
	<i>Pennisetum violaceum</i> (Lam.) Rich. ex Pers.	T	0.50	2.00	10.00	2.50		1.00	2.00	4.00	3.50	3.50
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i> L.	G	17.50	14.50	37.00	25.00	44.50	9.00	19.00	18.50	20.50	9.00
	<i>Alysicarpus ovalifolius</i> (S. & Th.) J. Léonard	T	0.50	0.50			0.50					0.50
	<i>Acacia hockii</i> DW.	T				0.50						
	<i>Crotalaria retusa</i> L.	T		0.50								
Fabaceae	<i>Crotalaria ononoides</i> Benth.	T			0.50			0.50		0.50		
	<i>Indigofera astragalina</i> DC.	T	6.00	4.00	1.50	8.50		3.50	2.00	0.50		4.50
	<i>Indigofera hirsuta</i> L.	T	0.50	0.50				1.00				
	<i>Indigofera omissa</i> JB Gillett	T		1.00				2.50	0.50	1.00		

	<i>Sesbania pachycarpa</i> DC.	T	9.00	3.50		0.50				6.00		2.00
Tiliaceae	<i>Corchorus tridens</i> L.	T	3.50	11.00	0.50	9.50	1.50	6.50	1.00	8.50	1.50	11.50
	<i>Triumfetta pentandra</i> A.Rich.	T	1.50	0.50		1.00		2.50		1.50		
Convolvulaceae	<i>Merremia aegyptia</i> (L.) Urb.	T		2.00		0.50		0.50	0.50			
Caesalpiniaceae	<i>Cassia mimosoides</i> L.	T	0.50									
	<i>Cassia obtusifolia</i> L.	T	1.00	8.00		2.00				2.50		2.50
Amaranthaceae	<i>Achyranthes aspera</i> L.	T				7.00		1.50		1.00		
Acanthaceae	<i>Peristrophe bicalyculata</i> (Retz.) Nees.	T	4.00	2.50		3.00	0.50	5.50		2.00		6.50
	<i>Peristrophe paniculata</i> (Forssk.) B.	T				0.50						
Commelinaceae	<i>Commelina benghalensis</i> L.	T				0.50		0.50				0.50
	<i>Commelina forskalii</i> Vahl.	T		1.00		1.50	3.00	0.50	0.50			1.00
Rubiaceae	<i>Spermacoce ruelliae</i> DC.	T							3.50		1.00	
	<i>Spermacoce stachydea</i> DC.	T	0.50				0.50			1.00		0.50

Lifeforms: Biological type; G: Geophyte; T: Therophyte.

2. 3. Diversity of weed species

The weed flora in the MS-MS-MS rotation included 22 weed species, whereas the other rotations included a slightly higher number of species (24 or 25). The floristic composition was more diverse in the subplots that were not cut back (18–22 species) than in the ones that were cut back (14–21 species). *Eragrostis tremula*, *Eragrostis ciliaris*, *Dactyloctenium aegyptium*, *Digitaria ciliaris*, *Digitaria horizontalis* and *C. rotundus* dominated in all plots. They accounted for 59–75% of the total population of weeds. The presence of species typical of environments that have hardly been disrupted or have been left untouched, such as *Achyranthes aspera* and *Cassia mimosoides*, was observed in all the rotations in which *S. hamata* had not been cut back, except for the MS-MS-MS rotation. Weed species' diversity determined by the Shannon-Weiner diversity index (H) was moderate (2.4–3.0) for the cut back treatments and high (3.1–3.5) for the ones that were not cut back (Tableau 33). Moreover, this reduction due to cutting back was more marked in the GS-MS-GS, MS-GS-MS and MS-MS-MS rotations. Considering the rotation, the H index was weaker in the MS-GS-MS sequence crop. Overall, the equitability was high in all treatments and even higher when plants were not cut back. Cutting back the vegetation after six weeks increased *E. tremula* abundance (data not shown), even though it reduced the number of weed species. In fact, the SC of this species increased by 9–26% in the different treatments after the vegetation was cut back, depending on the rotation. Conversely, the abundance of *D. aegyptium* and *D. horizontalis* declined after the biomass was cut back, and the SCs of these species fell by 5.6 and 10.6%, respectively. The presence of perennial species, such as *A. aspera* and *Corchorus tridens*, was reduced ($P < 0.05$) by cutting back the vegetation.

2. 4. Contribution to biovolume and weed biomass

The overall contribution of weed species to the biovolume varied depending on the treatment. It reached 40% on average for the GS-MS-GS and MS-MS-MS rotations. In the other rotations, it varied from 53.1 to 57%. Cutting back the vegetation affected the contribution of weed species to the biovolume, which increased by 19–32%. The dominant species in these populations, particularly *E. tremula*, *E. ciliaris*, *D. aegyptium*, *D. ciliaris*, *D. horizontalis* and *C. rotundus*, contributed 34.3–53.8% of the total biovolume. The contribution of *E. tremula* to the biovolume was even higher for treatments in which the vegetation had been cut back (between 27.1 and 47.9%), unlike those that were not cut back, in which it amounted to 4.2 and 13.4% depending on the crop rotation.

The weed biomass varied considerably among treatments and within a treatment. It was, on average, 1465 and 851 kg ha⁻¹ in subplots that had not been cut back, with and without organic fertilizer, respectively. For subplots that had been cut back, the weed biomass was 2470 and 2243 kg ha⁻¹, respectively, with and without organic fertilizer. The comparison of the rotations only showed significant differences for the non-fertilized and uncut treatments (Tableau 34). The aboveground weed biomass was lower in the MS-GS-MS crop sequence. For the same rotation, cutting back substantially increased the weed biomass with and without organic fertilizer. The biomass recorded for the crop sequences SF-GS-MS without any organic fertilizer and MS-GS-MS with and without organic fertilizer increased when the vegetation was cut back.

Tableau 33 : Variation in the diversity (H) and equitability (E) index in the crop rotations

Indices	Cutting back	Crop rotations				
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS
Diversity (H)	Cut back	3.00	2.80	2.70	2.40	2.80
	Uncut	3.30	3.50	3.50	3.10	3.50
Equitability (E)	Cut back	0.70	0.70	0.70	0.60	0.70
	Uncut	0.80	0.80	0.80	0.70	0.80

Tableau 34 : Production (kg ha⁻¹) of the total phytomass of weed species in the different crop rotations

Fertilisation	Cutting back	Crop rotations					Average
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS	
AM	Cut back	3078 ±2197 aA	2192 ±475 abB	2406 ±2210 aA	1948 ±387 a	2728 ±2208 aAB	2470^{NS}
	Uncut	2074 ±2899 aA	1419 ±1590 abB	1714 ±1744 aA	540 ±539 bc	1578 ±923 aAB	1465^{NS}
WAM	Cut back	3114 ±2283 aA	2010 ±923 aB	1375 ±281 aA	1775 ±438 ab	2939 ±2177 aAB	2243^{NS}
	Uncut	883 ±554 aAB	556 ±574 bB	1682 ±1791 aA	242 ±146 cC	891 ±873 aAB	851*
Average		2287^{NS}	1544*	1794^{NS}	1126**	2034^{NS}	

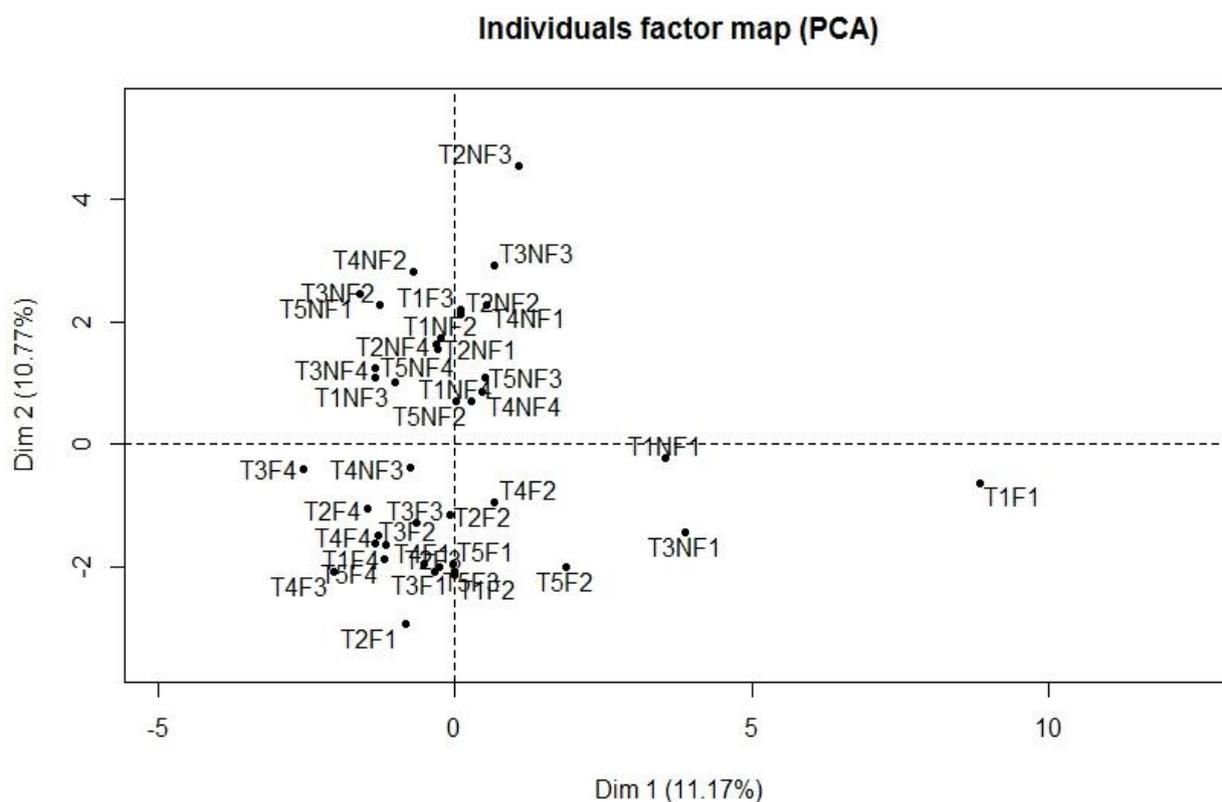
* Significant difference ($p < 0.05$) between treatments;

** Very High significant difference ($p < 0.001$) between treatments; NS, no significant difference;

Values with different lower-case letters differ significantly; within a row, values with different capital letters differ significantly.

2. 5. Phytosociology of the weed species

Although only 22% of the total variability was explained by the two first axes of the PCA (Figure 11), it appears that the composition and structure of the weed flora were primarily driven by the cutting back treatment. Only the SF-MS-GS treatments that were cut back in Block 3 (T1F3), uncut SF-MS-GS in Block 1 (T1NF1), uncut MS-GS-MS in Block 3 (T4NF3) and uncut GS-MS-GS in Block 1 (T3NF1) had a different floristic composition and/or weed flora structure compared to the other treatments for the same treatment. The effects of one or more factors (rotation, fertilization and/or plant residues), other than cutting back, were more marked in the floristic composition of the “cut SF-MS-GS in Block 1” plot (T1F1).



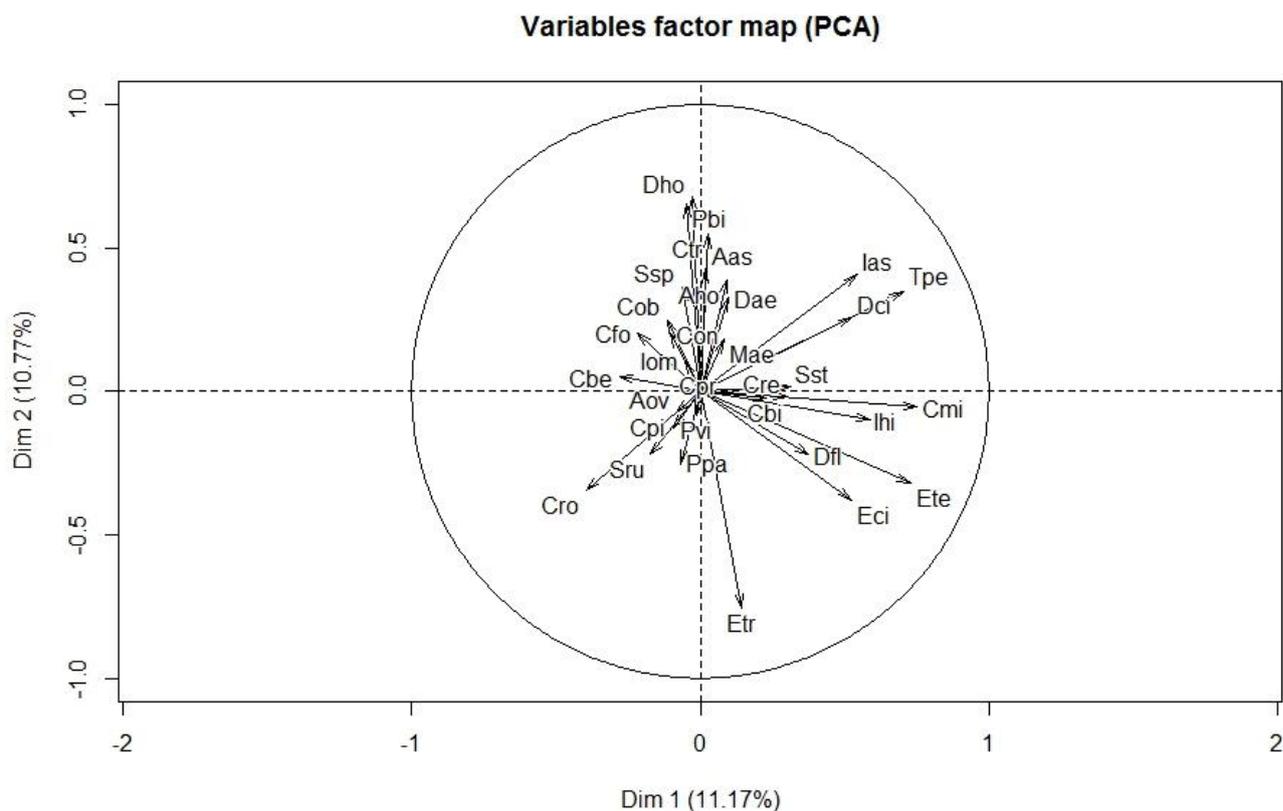
Legend : T1, SF-MS-GS; T2, SF-GS-MS; T3, GS-MS-GS; T4, MS-GS-MS; T5, MS-MS-MS;

NF, Uncut; F, cutting back; n ($1 \leq n \leq 4$), repeat (block);

For example: T2NF3, plot in rotation SF-GS-MS, uncut in mid-season, in the repeat (block) 3.

Figure 11 : Distribution map of plots based on the frequencies of weed species.

Approximately 10 weed species were correlated with the PCA axes. The behavior of weed species, as shown on the factor map (Figure 12), points to a strong correlation between the composition of the weed flora and axis 2 in the PCA, which is itself strongly correlated with the cutting back of vegetation. Cutting back the vegetation had an important role in the variability of *E. tremula* ($R^2 = 0.701$), *D. horizontalis* ($R^2 = 0.586$) and *Pennisetum violaceum* ($R^2 = 0.569$) in the plots (Table 6). In addition, a negative correlation was found between *E. tremula* and most others species. For weed species such as *Eragrostis tenella* (Ete), *Indigofera astragalina* (Ias), *Indigofera hirsuta* (Ihu), *C. mimosoides* (Cmi), *D. ciliaris* (Dci) and *Triumpheta pentandra* (Tpe), rotation and/or fertilization factors seem to predominate. An important correlation appears between *Digitaria fuscescens*, *E. ciliaris* and *E. tenella*, showing the tendency of these species to cluster together. These species are negatively correlated with the main perennial species.



Aho, *Acacia hockii* DW.; Aas, *Achyranthes aspera* L.; Aov, *Alysicarpus ovalifolius* (S. & Th.) J. Leonard; Cmi, *Cassia mimosoides* L.; Cob, *Cassia obtusifolia* L.; Cbi, *Cenchrus biflorus* Roxb.; Cpi, *Chloris pilosa* Schumacher; Cpr, *Chloris prieurii* Kunth.; Cbe, *Commelina benghalensis* L.; Cfo, *Commelina forskaolii* Vahl.; Ctr, *Corchorus tridens* L.; Con, *Crotalaria ononoides* Benth.; Cre, *Crotalaria retusa* L.; Cro, *Cyperus rotundus* L.; Dae, *Dactyloctenium aegyptium* Beauv.; Dci, *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler; Dfl, *Digitaria fuscescens* (J. Presl) Henr.; Dho, *Digitaria horizontalis* Willd.; Eci, *Eragrostis ciliaris* (Linnaeus) R. Brown; Ete, *Eragrostis tenella* (L.) P.Beauv. Ex Roem. & Schult; Etr, *Eragrostis tremula* (Lam.) Hoch. Ex Steud.; Ias, *Indigofera astragalina* DC.; Ihi, *Indigofera hirsuta* L.; Iom, *Indigofera omissa* JB Gillett; Mae, *Merremia aegyptia* (L.) Urb.; Pvi, *Pennisetum violaceum* (Lam.) Rich. ex Pers.; Pbi, *Peristrophe bicalyculata* (Retz.) Nees.; Ppa, *Peristrophe paniculata* (Forssk.) B.; Ssp, *Sesbania pachycarpa* DC.; Sru, *Spermacoce ruelliae* DC.; Sst, *Spermacoce stachydea* DC.; Tpe, *Triumpheta pentandra* A.Rich.

Figure 12 : Principal component analysis based on frequencies of weed species on plots.

2. 6. Crop production and yield

The yield of the main crop (millet or groundnut) is given in the “Tableau” 35. It shows variations in millet yield from a minimum of 17 kg ha⁻¹ in the MS-GS-MS rotation (uncut and zero-fertilizer treatment) to a maximum of 214 kg ha⁻¹ in the SF-GS-MS rotation (cutting back and fertilization treatment). Significant cumulative effects of AM and cutting back were observed on millet yield. Cutting back improves millet yield from 38 to 120%, whereas yield increase attributed to AM varies from 59–228%. The same trend was observed on the components of millet yield, especially the weight of 1000 seeds, which was significantly higher in AM and cutting back treatment (5.1 g) than WAM and uncut treatment (4.7 g).

Groundnuts yield was highly variable in the SF-MS-GS rotation (378–1053 kg ha⁻¹) compared to the GS-MS-GS rotation treatments (627–903 kg ha⁻¹). No clear effect of AM on groundnuts yield was found. However, a very significant effect of AM was observed on the weight of 100 seeds (74.07 g for the treatment with AM versus 69.1 g for the treatment WAM). Cutting back positively affects the yield of groundnuts, with a 14–43% increase.

Tableau 35 : Millet and peanut yields (kg ha⁻¹) measured in the third year of experimentation

Fertilisation	Cutting back	Crop rotations				
		SF-MS-GS	SF-GS-MS	GS-MS-GS	MS-GS-MS	MS-MS-MS
AM	Cut back	1053 ±565 a	214 ±130 a	722 ±273 a	69 ±35 a	95 ±16 a
	Uncut	887 ±383 a	98 ±54 ab	627 ±284 a	54 ±32 a	53 ±25 b
WAM	Cut back	761 ±201 a	66 ±13 b	903 ±506 a	29 ±20 ab	62 ±36 ab
	Uncut	378 ±162 b	29 ±22 c	797 ±119 a	17 ±9 b	31 ±12 b
Average		770*	102*	762^{NS}	42*	60***

* Significant difference ($p < 0.05$) between treatments;

** Very High significant difference ($p < 0.001$) between treatments; NS, no significant difference;

Values with different letters differ significantly.

V. 3. Discussion

The results showed that there is no treatment for which mulching was sufficient to control weeds. Teasdale and Mohler (2000) recommend at least 90% ground cover for controlling weeds. According to these authors, the range of values for weed suppression coefficients across mulches within a species is approximately 20–40-fold for mass. In our experiments, such a high ground cover rate could only be obtained for MS associations when all the cereal's aboveground biomass and *S. hamata* is used for mulch. This option is not realistic. Due to the severe forage deficit in the dry season (Guérin et al., 1985), crop residues are a staple food source for cattle (Dièye & Guèye, 1998). Using two-thirds of *S. hamata* for animal feed considerably reduced the contribution of the legume to the soil cover but induced a higher yield of the associated crops due to a lower level of competition from the cut stylo cover compared to the uncut stylo treatments (data not shown). Considering the low efficacy of the tested mulch-based systems in controlling weeds and their negative consequences on crop yields, an alternative could be to carry out more stylo cuttings associated with manual weeding along the crop seeding line. This would allow weed control in crop row at an early vulnerable crop stage and reduce stylo and weed competition while increasing the availability of high-quality animal feed. In this system, only cereal stalks would be left on the soil after the harvest. However, in the MS treatments, over half of the soil can still be covered with millet stems, and *S. hamata* biomass is left on the field. Considering the results of previous studies (Teasdale & Mohler, 2000; Naudin et al., 2011), the remaining litter will not be sufficient to control weeds, but it likely helps in improving the soil organic matter content and reducing soil erosion, which in turn could improve yields over the long term. Bilalis et al. (2003), quoted by Naudin et al. (2011), showed that low levels of ground cover (lower than or equal to 30%) result in weed infestation levels comparable to those found in conventional cropping systems.

Although they provide important and consistent ground cover at the end of the cycle, *S. hamata* plants have proven to be ineffective at controlling weeds as they become established at the same time as undesirable species. Indeed, no-till approaches maintain weed seeds on the soil surface and promote their germination in the rainy season. The identified weed species are common in annual crop fields in Senegal's Sudano-Sahelian region (Noba, 2002). Species of low nutritional value, such as *E. tremula* (Skerman & Riveros, 1990) and *Cyperus* spp., dominate in cleared plots, whereas species that are known to be productive and of high nutritional value, such as *D. ciliaris* (Skerman & Riveros, 1990), are more common in uncut plots. These findings suggest that it should be possible to improve the production of quality forage in this type of cropping system by manipulating the cutting level of *S. hamata*. On-farm research could be carried out at the farm level to assess the acceptability of such practices.

The dominance of half a dozen species is reflected in the diversity and equitability indices. The dominance of annual species is in line with the results of Menalled et al. (2001) and Chauvel et al. (2011), which showed that refraining from ploughing promotes the development of annual species with low dormancy. These authors also observed the development of perennial species encouraged by the limitation of disruption affecting ecosystems that are not ploughed. In fact, the presence of *C. mimosoides* and *A. aspera* indicates that the plots were established on newly cleared land that has been extensively cultivated. In addition, considering that repeated weeding makes it possible to eliminate *A. aspera*, its existence in the plots indicates the limitations of the tested practices in terms of controlling it.

Weed management techniques, such as mowing aboveground biomass, influence weed species composition and abundance more than crop sequence. The effects of crop rotation on weed population seem to be only significant in the long term (Menalled et al., 2001; Teasdale et al., 2004; Wortman et al., 2010). According to Teasdale et al. (2004), the rotations with the most phenologically diverse crops will result in the greatest decrease in weed population and abundance. The small variation in weed composition between rotations can be attributed to the permanent presence of *S. hamata*, which promotes biodiversity (Wortman et al., 2010). Managing plant cover by cutting back and removing the aboveground biomass affects the structure of the flora without actually reducing weed infestation levels. Cutting back vegetation promotes the development of heliophilous weed species, such as *E.*

tremula, while reducing the diversity of *D. aegyptium*, *D. horizontalis* and perennial species. Annual species usually have shallow root systems and require less effort in terms of manual management. In fact, the plant cover provided by *S. hamata* greatly inhibits the germination of *E. tremula* seeds by reducing the incidence of radiation on the ground (Scopel et al., 1999; Teasdale & Mohler, 2000; Noba, 2002). In addition, the more or less extended germination period of the species enables it to re-emerge after weeding. Conversely, *D. aegyptium* is a species that germinates early (Noba, 2002); it develops best if cover is provided due to the species' preference for mulch, possibly because of a stimulating effect of the mulch's allelochemicals (Poilecot, 1999). This ecological characteristic of the species is exploited in Kenya, where pastures seeded with *D. aegyptium* are covered with branches or mulch (Skerman et Riveros, 1990).

Over the long term, cutting back vegetation might have more marked effects on the diversity and structure of weed species. Menalled et al. (2001) showed that changes in the vegetation structure have a long-term effect on the diversity of species in seedbanks. Reducing the aboveground biomass by mowing during the most critical period of weed persistence can stifle the expansion of some weed species because some species produce very few seeds if the aboveground biomass is destroyed during this period (Ghersa et al., 2000). The study did not show any effects of organic fertilizer on the weed species composition or structure. This result could be explained by the experiment duration and the application of this factor only after the second year. Some authors (Teasdale et al., 2004) have shown that changes to the soil chemical conditions induced by the addition of organic manure over a long period affect the composition of the weed flora in organic farming cropping systems. In our trial, the increase in weed biomass in fertilized subplots was higher than that observed for *S. hamata*. This is consistent with the observations of Blackshaw et al. (2005), who report that weeds benefit from organic fertilizer application more than crops. An increase in weed infestation can be expected over time in these treatments if no measures are taken to limit their development.

The variations in yield can be explained by several factors, including the density of the main crop (millet or groundnut), the nuisance of *S. hamata* and weeds and the sensitivity of the crops to competition and to the growing conditions (organic manure, quantity of mulch, irrigation).

The low performances of production observed in the MS-MS-MS and MS-GS-MS rotation could be related to the density of *S. hamata* and of the weeds' higher and/or lower soil cover by mulch. Despite a corrective irrigation of 180 mm, the particular low rainfall in 2014 (331 mm versus 767 in 2012 and 603 mm in 2013) was a major limiting factor to improve yield through AM. The importance of sufficient rainfall for the efficiency of use of organic fertilizer by the crops has been reported by Buldgen et al. (1995). The water stress could have affected crop yield in two ways: increased competition between crops and companion crop or weeds resulting in poor filling of millet ears or pods and low mineralization of organic manure resulting in low availability of nutrients.

Conclusion

The direct-seeding mulch-based cropping systems tested in this experiment were characterized by major weed infestations despite annual weeding at the start of cultivation and despite the important ground cover provided by *S. hamata* at the end of the rainy season. Using two-thirds of the *S. hamata* biomass for animal feed considerably reduced the contribution of the legume to the soil cover, which was too low to control weeds in all the compared treatments. The diversity of the weed flora varied according to the crop rotation. However, management practices, such as mowing aboveground biomass, influence weed species' diversity and abundance more than crop rotation. The weed flora is dominated by several grass species and *C. rotundus*. The aboveground biomass management measures in the plots, such as cutting back and removing biomass, affected the structure and diversity of the weed flora without reducing the weed infestation level. They reduce perennial species and promote the development of heliophilous species. This modification of the weed flora structure could be beneficial in cases of minimal disturbance to the soil by weeding. Organic manure had a significant effect only on the overall weed biomass, which responds more favorably to organic fertilizer. We can assume that the increase in weed biomass caused by the application of manure will ultimately result in higher weed seed production. Consequently, the abundance and diversity of weed species might be affected by the addition of organic manure over the long term. Our work confirms that, under the conditions

prevailing in the Groundnut Basin of Senegal, weed management in cropping systems without ploughing requires specific solutions that are tailored to the farmers' conditions and production targets. In this region, the use of herbicides is very scarce due to the low capacity of these farmers to buy them and the technical expertise required. The search for agricultural alternatives could focus on a long-term approach combining management practices such as crop rotation, mowing the aboveground biomass and weeding along the crop seeding line. Combined with cutting back the aboveground biomass, weeding the seeding line could be a compromise between slightly disturbing the soil and limiting the negative effects of weeds on crops.

Chapitre VI

Discussion générale

VI. 1. Critique de la méthodologie adoptée

La problématique de cette thèse soulève la complexité des questions de recherche agronomique, du développement agricole et les limites de la recherche classique, pour solutionner des problèmes majeurs des exploitations agricoles familiales (EAF) notamment dans le bassin arachidier du Sénégal. En effet, la recherche agricole doit répondre de manière efficace et durable aux besoins de production des EAF, dans un contexte de variabilité et de dégradation des conditions biophysiques et socio-économiques. La portée multidimensionnelle de la question nécessite une approche systémique et un changement de paradigme de la recherche (Faure et al., 2010; Ribeiro et al., 2015; Tiftonell et al., 2010). Pour cela, plusieurs auteurs (Schuler et al., 2014; Tiftonell et al., 2010) suggèrent une typologie à différentes échelles (village, exploitation, parcelle) qui permet de mieux circonscrire les objectifs et la stratégie des EAF, d'une part, et d'orienter la démarche et l'action de recherche, d'autre part. D'autant qu'elle permet de produire des connaissances adaptées pour résoudre des problèmes agronomiques et/ou sociaux importants (Faure et al., 2010), la recherche-action en partenariat est une des approches prometteuses parmi un ensemble de modèles (Meinke et al., 2001). Cependant, la diversité et les variations des facteurs expérimentaux en champs paysans et le caractère aléatoire de la plupart d'entre eux ne sont pas compatibles avec une démarche rigoureuse de recherche. En effet, les sites d'expérimentation en milieu paysan ne constituent pas, véritablement, des répétitions même s'ils sont considérés comme telles dans l'analyse. Les variations de nombreux facteurs fondamentaux (pluviométrie, fertilité sol, topographie, acteurs, etc.) peuvent être des biais et des sources de variations importantes dans le dispositif et les résultats expérimentaux. Ce fut le cas de l'application de la fauche de *S. hamata* qui, effectuée à différentes dates, affecte le comportement de la plante; de même que la modification du protocole par certains producteurs pilotes avec l'introduction d'un ou de plusieurs facteurs de différenciation entre les sites ou encore de la diminution du nombre d'objet du dispositif expérimental.

Pour compenser ces manquements et anticiper sur les risques liés à la recherche en parcelles paysannes, une expérimentation parallèle en station est essentielle. Cette approche semble nécessaire pour satisfaire l'exigence de rigueur scientifique et d'efficacité de la recherche à apporter des solutions dans un contexte incertain et complexe. Elle permet, en outre, d'établir un équilibre entre la création de connaissances et l'action de développement. La combinaison des résultats des expérimentations en station et en milieu paysan devrait permettre *in fine* d'apprécier le potentiel de développement des technologies mises au point, les variations induites auprès des acteurs dans les conditions spécifiques des exploitations familiales. En outre, cette démarche offre des garanties de faisabilité des technologies conçues (Schlecht et al., 2007; Badiane et al., 2000) et laisse entrevoir les adaptations nécessaires à leur adoption. L'application du sarcage dans la ligne de semis est un exemple d'adaptation des systèmes en SCV par les producteurs pour gérer la biomasse de stylosanthes. Toutefois, l'étude des systèmes de production agricole et la co-conception de pratiques innovantes ne sont pas simples à mettre en œuvre, du fait du temps long requis et de la nécessité de mobiliser d'importantes ressources (Chia, 2004; Meinke et al., 2001). Notre étude, réalisée en 3 ans avec une dizaine de producteurs pilotes, présente sans doute des limites comparée à celles menées en Amérique latine et en Afrique (Cameroun, Zimbabwe, etc.), sur 8 à 15 ans avec la participation d'une centaine de producteurs (Vall et al., 2016; Chivenge et al., 2007; Zibilske et al., 2002). Ces auteurs ont montré que les trois premières années d'expérimentation en parcelles paysannes permettent de consolider le noyau de producteurs pilotes d'autant que la plupart des abandons survienne durant cette période. Par ailleurs, la perspective d'investigations dans le long terme contraste généralement avec la vision à court terme des EAF (Corbeels et al., 2014). Cependant, elle est indispensable pour mettre au point, adapter et évaluer les effets bénéfiques des technologies nouvelles d'agriculture de conservation qui ne sont perceptibles qu'à long terme, sur le revenu des agriculteurs et l'amélioration de la fertilité du sol (Corbeels et al., 2014; Verachttert et al., 2009). A travers cette démarche de recherche-action en partenariat, les EAF ont participé à la conception, testé et adapté des systèmes de culture en SCV de *S. hamata*.

VI. 2. Performance de production

Les performances de production des EAF du sud du bassin arachidier sont globalement faibles et très variables, dépendant de conditions climatiques aléatoires, pédologiques et socioéconomiques. Les

données d'enquêtes de caractérisations des EAF et des systèmes de production illustrent cette faiblesse des rendements des cultures (moins de 1,2 tonne.ha⁻¹ sur un potentiel de plus de 2 t pour l'arachide et moins de 1 tonne.ha⁻¹ pour le mil) et cette variabilité entre les villages. Les localités situées plus au sud sont sur des isohyètes plus pluvieuses, avec souvent des pauses pluviométriques moins longue d'un à plusieurs jours. Elles bénéficient ainsi des avantages pluviométriques en termes de volume des précipitations et de séquences sèches plus courtes (pauses pluviométriques) qui, mêmes s'ils sont modérés, affectent considérablement les performances de production. Ce sont principalement les villages de Keur Serigne Bamba, Keur Seyni Guèye et, dans une moindre mesure, Dantakhone qui sont dans cette situation et qui enrégistent les meilleurs rendements des cultures. La situation socioéconomique détermine également les performances de production des EAF. Les types I et IV qui ont une situation socioéconomique plus favorable sont plus performants. Leurs performances sont déterminées principalement par leur niveau d'équipement qui permet la bonne exécution du calendrier cultural, leur pratique d'élevage qui permet de soutenir une fertilisation organique des champs, leurs capacités d'investissement dans la production (achat d'engrais, de semences, etc.). En effet, l'intensification par la fumure organique du mil ou la fertilisation minérale de l'arachide n'est pas souvent réalisable, en raison de la capacité d'investissement limitée de la majorité des EAF. L'étude du potentiel des systèmes de culture en SCV de *S. hamata* est importante en vue d'améliorer la productivité, l'efficacité, l'autonomie et la résilience des systèmes de production familiale. Elle montre des performances variables, entre la recherche en station et en parcelles paysannes, liées principalement à la diversité des paramètres qui ne sont pas maîtrisés en expérimentation en milieu paysan. Les conditions pédoclimatiques et les niveaux d'engagement des acteurs très variables ont affecté les résultats ou compromis la conduite de l'expérimentation dans certains villages. La variabilité de la production, observée entre les sites des essais en milieu paysan, illustre la nécessité de définir des conditions de culture en SCV de *S. hamata* qui n'est pas une solution à toute épreuve (Lahmar et al., 2012). Par ailleurs, les performances observées en SCV de *S. hamata* sont généralement inférieures ou équivalentes à celles des systèmes traditionnels établies entre 200 et 900 kg.ha⁻¹ pour le mil, et entre 300 et 1250 kg.ha⁻¹ pour l'arachide. Ces résultats corroborent ceux d'études antérieures sur une potentielle baisse de la production agricole en SCV comparé aux systèmes de culture conventionnels (Erenstein, 2003; Lahmar et al., 2012; Penot et al., 2015). Les effets du SCV sur le rendement, neutres en année d'installation de la plante de couverture, ont été négatifs les années ultérieures, avec des niveaux variables de dégradation de rendements pouvant atteindre 90%. En effet, une fois établi, *S. hamata* exerce une concurrence vis-à-vis de la culture principale dont l'intensité et les effets semblent dépendre de sa densité de couverture, de la fertilité du sol, du niveau d'apport en eau (pluviométrie et/ou irrigation) et du type de culture (arachide ou mil). Ainsi, il a été montré que les productions d'arachide et de mil sont négativement corrélées à la biomasse végétale de *S. hamata*. Ces baisses de production ont été plus marquées (en valeur relative) sur l'arachide que sur le mil. Cette sensibilité plus élevée de l'arachide à la concurrence de stylosanthes s'explique en partie par les nombreuses similitudes entre les deux cultures : besoins en nutriments, disposition dans l'espace par rapport à l'ensoleillement, etc. Ces pertes de production surviennent par différents mécanismes aux effets cumulatifs : réduction de la densité réelle par rapport au semis, retard de croissance de la culture, baisse de production (poids des épis, nombre de gousses par pieds), qualité moindre de la production (remplissage des gousses, par exemple). Des solutions simples, pratiques et adaptées aux conditions des EAF du bassin arachidier permettant de contenir les effets dépressifs de *S. hamata* sur les rendements sont nécessaires pour intéresser les producteurs à ces technologies agricoles. L'amélioration de la fertilité du sol par la fumure organique pourrait être une solution prometteuse pour relever la production du mil et limiter la concurrence de *S. hamata*, à conditions d'un apport hydrique satisfaisant. En effet, l'AFO a été efficace pour améliorer la production de mil grains des systèmes en SCV à un niveau comparable à ceux de l'assolement Mf-Mf-Mf lorsque les apports hydriques ont atteint 750 mm (603 mm de pluies et 150 mm par irrigation). La conditionnalité d'une humidité suffisante du sol, pour observer cette réponse positive du mil à l'AFO, est étayée par les résultats de la 3^{ème} année (2014) lorsque les apports hydriques ont baissé (511 mm dont 331 mm de pluies et 180 mm d'eau d'irrigation). La réponse du mil à l'AFO se manifeste exclusivement sur la production de grains sans affecter la production de tiges : ce qui laisse entrevoir des possibilités de redéfinir les ratios Grains/Tiges des variétés de mil par rapport aux systèmes de culture (SCV, monoculture, etc.) et aux pratiques agricoles (fumure organique, par exemple). Ce résultat positif en termes de production du mil par l'AFO est soutenue par la réponse positive de la culture à la fertilisation, meilleure que celle de la légumineuse (Buldgen et al., 1995) et les conditions optimales

(température et surtout humidité du sol) pour une activité biologique, la minéralisation de la matière organique et l'utilisation des nutriments par les cultures. Dans les associations *S. hamata* – arachide, la réponse du stylosanthes à la fumure organique a été meilleure que celle de l'arachide exacerbant la concurrence. Ceci explique la diminution du rendement en gousses dans les systèmes en SCV, avec l'AFO. Ces résultats semblent montrer que les possibilités de développement de systèmes de culture en SCV avec l'arachide sont très limitées; les effets positifs s'observent qu'à la phase d'installation de *S. hamata* avec un meilleur établissement de la plante de couverture. En conséquence, l'association *S. hamata* – arachide est la meilleure modalité d'installation de stylosanthes parmi toutes celles qui ont été testées mais, une fois stylosanthes établi, cette forme de polyculture est désavantageuse du fait de la concurrence exercée. La fauche de la biomasse de *S. hamata* pour réduire cette concurrence a une portée limitée ; son potentiel pour rétablir les rendements à des niveaux comparables aux systèmes traditionnels est faible (en moyenne de 15 à 30% chez le mil, 10 à 25% chez l'arachide). Toutefois, ces effets sont très marqués par rapport aux parcelles non recépées : doublement ou plus de la production. En outre, les résultats obtenus en milieu paysan semblent indiquer des effets plus bénéfiques du recépage sur le rendement liés à l'utilisation de variétés de mil à cycle long ou tardive (120 jours contre 90 jours de la variété Souna 3 expérimentée en station). En effet, l'allogement du cycle de végétation permet à la culture de reprendre son rythme de développement après le recépage et de rattraper partiellement le retard de croissance engendré par la concurrence de stylosanthes. Par ailleurs, il existe une différence, entre les variétés de mil, de niveau de sensibilité à la densité de la légumineuse cultivée en association (Traoré et al., 2007) qui prédisposent certaines variétés mieux que d'autres à l'association culturale.

VI. 3. Développement de synergies et gestion durable des sols

Le principal intérêt des systèmes de culture en SCV, pour la région du bassin arachidier du Sénégal, devrait être le développement de synergies entre l'agriculture et l'élevage et une meilleure gestion des sols. En effet, les intérêts potentiels en termes de rendements agricoles ne sont obtenus que sur le mil, avec l'AFO. Les possibilités de valorisation d'une partie du fourrage de *S. hamata* en alimentation animale sont particulièrement intéressantes, notamment avec le recépage de la plante qui augmente la production de biomasse totale et sa qualité nutritive. Ceci devrait contribuer à améliorer la disponibilité fourragère au niveau des EAF et renforcer la stabulation. Les quantités de biomasse de stylosanthes produits sont de l'ordre des valeurs établies par les travaux antérieurs en Afrique subsaharienne (Coulibaly, 1996) : faible en année d'installation (188 à 1167 kg MS) elle atteint 3 à 4 tonnes.ha⁻¹ les années suivantes. Certes les faibles quantités de biomasse produites en 1^{ère} année sont liées au rythme lent de l'installation de stylosanthes mais les variations importantes enregistrés sont déterminées par les différences de modalités de culture. L'association *S. hamata* – arachide a été la meilleure modalité pour favoriser l'installation de stylosanthes et la production de biomasse. Elle s'est manifestée à travers un développement plus important et des ramifications plus nombreuses de la plante. La culture de l'arachide favoriserait le processus de nodulation chez stylosanthes et son fonctionnement qui est un facteur d'accélération de la croissance. Les exportations d'une partie de la biomasse végétale pour alimenter le bétail représentent des pertes considérables de nutriments pour les sols cultivés si elles ne sont pas compensées par les apports de fumure organique. Pour préserver la qualité des sols, il est indispensable de lui restituer les résidus de cultures, particulièrement les tiges de mil dont la valeur fourragère est faible (Van Zanten et al., 2019), d'une part, et de transférer la fumure organique produit par l'élevage vers les champs. Le circuit de transformation de biomasse fourragère en fumure organique n'apporte pas, toutefois, un supplément de nutriments au sol et des pertes d'une quantité d'éléments nutritifs sont inévitables. La création de ces synergies, avec des flux de matières dans les deux sens, n'est possible qu'avec le parage d'animaux dans l'exploitation familiale, pour assurer le recyclage de la biomasse fourragère et récolter la fumure organique produite. Dans ces conditions, il convient de considérer que 30% des EAF du bassin arachidier, composées essentiellement de petits agriculteurs, ne pourraient pas pratiquer les systèmes de culture en SCV: incapacité de produire de la fumure organique, risques élevés de production (chute de production, insuffisance main d'œuvre pour la gestion de l'enherbement), faible disponibilité en terre. Pour les autres catégories d'exploitation, la biomasse de *S. hamata* produite (en moyenne 4 t.ha⁻¹) ne devrait pas permettre des doses importantes de fertilisation organique (5-10 t.ha⁻¹). Elle correspond, en effet, au besoin annuel d'ingestion de matière sèche de 1,75 UBT (Unité bétail tropical), ayant un potentiel de production journalière de 1,9 à 2,9 kg MS de déjections (soient 1,21 à 1,85 t.ha⁻¹) (Lhoste et Richard,

1993). Lorsqu'une partie de cette biomasse de *S. hamata* est restituée au sol sous forme de "mulch", le potentiel d'affouragement au sein de l'exploitation diminue entraînant une diminution de sa capacité de fumure organique. Ces limites devraient inciter à la combinaison de plusieurs voies d'amélioration de la fertilité des sols, notamment la restitution au sol des tiges de mil. L'adoption de ce mode de gestion de la fertilité des sols qui contraste avec la pratique traditionnelle de brûlis des débris de végétaux avant les semis des cultures exige des changements majeurs dans la préparation de champs. Ces recherches montrent que l'AFO est une condition nécessaire et efficace, pour améliorer la fertilité des sols. L'amélioration de la teneur en matière organique du sol affecte de manière positive l'ensemble des propriétés biologique, physique et chimique du sol, notamment la stabilité structurale, la capacité d'échange cationique, la capacité de rétention, le fonctionnement du complexe argilo-humique, la disponibilité des nutriments, etc. (Nacro et al., 2010; Pallo et al., 2006). La combinaison de l'ensemble des voies d'amélioration de la fertilité des sols (SCV, AFO, limitation labour, etc.) favorise l'équilibre des nutriments.

Il ressort de ces recherches que les intérêts majeurs des systèmes en SCV pour le bassin arachidier se rapportent à la diversification des productions, au développement de synergies entre les cultures et l'élevage et à la gestion des ressources productives pour stabiliser les rendements. Ces services sont essentiels pour les systèmes agricoles qui utilisent peu ou pas d'intrants pour favoriser le recyclage d'une proportion importante de ressources naturelles à travers l'intégration soutenue entre agriculture et élevage.

VI. 4. Apprentissage, adaptation et innovation des producteurs

La démarche de recherche-action en partenariat est une approche de la recherche qui favorise l'apprentissage par la pratique et l'expression du potentiel innovant des producteurs. En effet, un processus d'apprentissage des producteurs se manifeste spontanément avec l'adoption de la démarche de recherche-action. L'apprentissage des producteurs du bassin arachidier s'est réalisé par la pratique sur le terrain durant toute la période d'expérimentation, à travers des tests, d'erreurs et d'ajustements. Il nécessite un investissement conséquent en informations, en formation technique et en ressources, pour le suivi, qui n'est pas facile à mobiliser. Les réunions d'échanges et d'évaluation ainsi que les visites de terrain ont été un puissant moyen pour faire valoir l'engagement, la légitimité et de la capacité d'initiative des acteurs. En effet, la participation des producteurs dans les recherches et la mise en place d'un cadre d'incitation permanente sont essentielles à la réflexion de l'ensemble des acteurs sur les choix méthodologiques et les résultats obtenus (Faure et al., 2010). Elle favorise la créativité et l'innovation des producteurs, du point de vue technique et organisationnel (Petit et al., 2015). L'émergence d'innovations peut entraîner un écart entre les objectifs initiaux de l'expérimentation et les solutions techniques finales (Dugué et Olin Bassala, 2015). Le contexte de recherche favorable à l'expression du savoir-faire et du potentiel novateur des producteurs a favorisé l'adaptation de la technologie d'AC et l'introduction du sarclage dans la ligne de semis, pour limiter les effets de l'enherbement et de la concurrence de *S. hamata*. L'adaptation des technologies d'AC aux conditions et aux systèmes de culture est souvent une solution pour leur adoption (Corbeels et al., 2014; Petit et al., 2012). Elle permet plus d'efficacité et de durabilité des solutions techniques pour répondre aux problèmes agronomiques (Vall et al., 2016).

VI. 5. Perspectives de développement de la recherche

Les essais mise au point de systèmes de culture en SCV dans le bassin arachidier étant à leurs débuts, plusieurs questions de recherche ne sont pas encore abordées ; ce qui constituent des domaines d'investigation pouvant expliquer et/ou améliorer les résultats obtenus. Cette recherche requiert un pas de temps assez long, de l'ordre d'une décennie d'expérimentation (Penot et al., 2015; Corbeels et al., 2013; Schlecht et al., 2007), pour apprécier son potentiel de services en termes de fertilité des sols et de performances de production mais également concernant le comportement des producteurs, l'efficacité des adaptations et l'adoption des technologies promues.

Parmi les modalités d'installation de la culture *S. hamata* qui ont été testées, l'association avec l'arachide a montré le meilleur développement de la plante de couverture. Cependant, les facteurs et les mécanismes qui sous-tendent ce résultat ne sont pas élucidés. Ils seraient

liés à la précocité de la nodulation et de la fonctionnalité des nodules (Sungthongwises et al., 2011). La recherche sur la densité de semis de l'arachide, en association avec *S. hamata*, sur la nodulation et le développement du système racinaire devrait être envisagée, pour déterminer les souches de rhizobia, leur densité sur les racines, leur efficacité de fixation d'azote, leurs effets sur le développement des cultures, etc.

Il est établi qu'une fois installé, *S. hamata* exerce une concurrence vis-à-vis de la culture associée dont les effets dépressifs sur les rendements constituent un risque majeur de rejet des systèmes de culture en SCV. Cependant, les mécanismes qui régissent cette concurrence ne sont pas totalement élucidés : ce qui laisse en suspend un certain nombre de questions (quelles sont les niveaux critiques de couverture du sol par stylosanthes induisant un retard de croissance, une perte de densité, etc., par exemple). De même, les intérêts des pratiques de gestion de la fertilité du sol (AFO) et de la biomasse de couverture devraient être plus approfondis. En effet, l'AFO semble, sous conditions d'humidité du sol suffisante, une pratique de mitigation du risque de perte de rendement de la culture du mil. La définition des modalités et des doses de fumure organique efficaces, pour résorber les effets concurrentiels de *S. hamata* sur la production de mil, est indispensable à la gestion de cette ressource dans l'EAF. Ainsi, la recherche devrait dégager la symétrie entre les doses minimales de fumure organique permettant de garantir un équilibre des cultures, de la fertilité du sol et la capacité de production de déjections animales des EAF. De manière générale, la réflexion devrait être engagée sur la modélisation des EAF, usagères des systèmes en SCV, en terme de superficie cultivée en SCV, d'espèces et d'effectif d'animaux élevés, de quantification des flux de matières (fourrage, fumier) pour un équilibre fonctionnel du système de production, de dynamique de fertilité du sol, de résilience aux risques climatiques et de revenus agricoles. Ces EAF modélisées pourraient tester de nouveaux systèmes de culture en SCV qui proposent une réorganisation des assolements traditionnels (A-M-A ou M-A-M) pour adopter la rotation A-M-M. Dans ce cas, l'installation de stylosanthes pourrait correspondre à la culture de l'arachide dans la rotation : ce qui favoriserait l'établissement de la légumineuse de couverture. Les cycles successifs de culture du mil devraient être les périodes d'AFO, de recépage de la biomasse de couverture et l'application du sarclage dans la ligne de semis. Cette recherche pourrait être combinée à l'évaluation de la réponse des variétés hâtive et tardive, de mil notamment, au SCV et aux pratiques de fumure organique. En effet, l'étude de trois variétés de mil par Traoré et al. (2007) montre une différence de sensibilité à la densité de semis de la légumineuse (en association) qui, lorsqu'elle est très élevée, affecte négativement le rendement. En outre, la réponse variétale du mil aux pratiques de gestion de la biomasse de couverture telles que le recépage de *S. hamata* et le sarclage dans la ligne de semis serait un axe de recherche pouvant conduire à la détermination de la durée du cycle des variétés propices au SCV. La concurrence de stylosanthes étant conditionnée par son niveau de couverture du sol qui dépend du ressemis naturel (quantité de semences au sol), la mise au point de technologies de récoltes des semences devrait contribuer à réduire son stock dans le sol et, par conséquent, la densité de la végétation issue du ressemis naturel ; ce qui pourrait être les jalons de la création d'une filière semencière de *S. hamata*, surtout après purification et enrobage des semences. En outre, la récolte et la disponibilité des semences sont nécessaires à l'adoption et la mise à l'échelle du SCV (Morse and Mc Namara, 2003; Asongwed-Awa and Njoya, 2002). En milieu paysan, les recherches sociologiques liées au processus de sélection des acteurs, à l'identification du besoin en encadrement et à la problématique du foncier rural sur la mobilisation de terre pour l'installation de parcelles pilotes devraient contribuer à lever les contraintes majeures de la recherche-action en partenariat.

Conclusion générale

La typologie des exploitations familiales et des systèmes de production du bassin arachidier du Sénégal montre une grande diversité de caractéristiques déterminées par la disponibilité de terres cultivables, la taille et la composition du cheptel, l'équipement en matériels agricoles de traction animale. Les systèmes de culture pratiqués, dominés par la rotation arachide/mil et la monoculture du mil, donnent de faibles rendements dépendant de la fertilité limitée des sols, de la faiblesse (voire l'absence) de fertilisation organique et/ou minérale et des conditions pluviométriques souvent déficitaires. Les intérêts potentiels du SCV de *S. hamata*, pour renforcer les synergies entre les cultures et l'élevage, ne sont pas acquis sans difficulté. Le risque élevé de baisse de production, dépendant de la couverture végétale et de la concurrence de *S. hamata*, constitue une contrainte majeure au développement des systèmes de culture en SCV. En effet, les performances de production des systèmes en SCV ont été généralement plus faibles que celles des systèmes traditionnels améliorés. La fumure organique et, dans une moindre mesure, le recépage de la biomasse de *S. hamata* permettent de réduire cette diminution de la production. Les effets dépressifs de la concurrence de *S. hamata*, sur la production de mil, peuvent être annulés par la fumure organique. En plus de limiter la perte de production, le recépage permet d'augmenter la biomasse totale de *S. hamata* et d'améliorer la qualité nutritive du fourrage. Ceci renforce l'intérêt de la pratique de la fauche de la végétation qui favorise la disponibilité de fourrage et la production de fumure organique au niveau des EAF. La co-conception de pratiques de SCV, en partenariat avec les producteurs, se heurte à de nombreuses contraintes environnementales, techniques, logistiques et humaines qui se traduisent par des écarts importants en termes de performances de production et d'engagement des acteurs. Les technologies de SCV ne peuvent être pratiquées *sensu stricto* dans le bassin arachidier; elles doivent être adaptées aux conditions et aux pratiques culturelles des EAF. Ainsi, le sarclage dans la ligne de semis pourrait être appliqué pour contrôler de l'infestation par les adventices. En effet, les niveaux d'enherbement élevés observés en SCV requièrent des pratiques de gestion spécifiques pouvant intégrer le sarclage dans la ligne de semis. Le développement du SCV dans le bassin arachidier nécessite la combinaison de plusieurs pratiques de gestion de la fertilité des sols telles que l'application de la fumure organique, la restitution tiges de céréale et la limitation labour ainsi qu'une gestion de la couverture végétative.

Références bibliographiques

Aertsen W., Kint V., van Orshoven J., Ozkan K., Muys B., 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling* 221 (8):1119-1130. doi :DOI 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007

Akaike H., 1974. New look at statistical-model identification. *Institute of Electrical and Electronics Engineers' Transactions on Automatic Control*, 19, 716-723.

Akinlade J.A., Farinu G.O, Agboola O.O., Akingbade A.A., Ojebiyi O.O. and Aderinola O.A., 2008. Nutritive value of four accessions of *Stylosanthes scabra* in the derived savana zone of Nigeria. *Tropical Grasslands* (2008) Vol. 42. Pp 120-123

Asongwed-Awa A. and Njoya A., 2002. Integrated approach to forage seed production and supplementation of dairy cows in the semiarid region Cameroon. *Revue Elev. Méd. vét. Pays trop.*, 2002, 55(4): 269-274

Aune J.B. et Bationo A., 2008. Agricultural intensification in the Sahel - The ladder approach. *Agricultural Systems* 98 (2008): 119-125

Badiane A.N., Diagne M., Fall A., Faye A., Kébé M., Khouma M., Sène M., 2000. Gestion et transformation de la matière organique - Synthèse des travaux de recherche menés au Sénégal depuis 1945. Edition ISRA, novembre 2000. 131 p.

Badiane A.N., Ganry F., Jacquin F., 1999. Les variations au champ de la biomasse microbienne d'un sol cultivé: conséquences sur la réserve organique mobilisable (cas d'un sol ferrugineux tropical du Sénégal). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 328 (1999): 45-50

Bado B.V., 2002. Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso. Thèse de doctorat, Département des sols et de génie agroalimentaire, Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation - Université Laval, Québec. 184 pages

Bado B.V., Bationa A., Lompo F., Cescas M.P. and Sedego M.P., 2007. Mineral fertilizers, organic amendments and crop rotation managements for soil fertility maintenance in the Guinean zone of Burkina Faso (West Africa). A. Bationo (eds.), *Advances in integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities*: 171-177.

Baldé A.B., 2011. Analyse intégrée du partage des ressources (eau, azote et rayonnement) et des performances dans les systèmes de culture en relais sous semis direct en zone tropicale subhumide. Thèse de doctorat, Centre International d'Etudes Supérieures en Sciences Agronomiques Montpellier, Ecole Doctorale Systèmes intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosociences, Environnement. 155 p.

Bamikole M.A., Babayemi O.J., 2004. Feeding goats with guinea grass verano stylo and nitrogen fertilized grass with energy concentrate. *Archivos de Zootecnia*, vol. 53, nùm. 201, 2004. Pp 13-23

Bationa A. & Buerkert A., 2001. Soil organic carbon management for sustainable land use in Sudano-Sahelian West Africa. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61 (2001) : 131-142.

Baudron F., Jaleta M., Okitoi O., Tegegn A., 2014. Conservation agriculture in Africa mixed crop-livestock systems: expanding the niche. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187 (2014) : 171-182.

Baudron F., Titttonell P., Corbeels M., Letourmy P., Giller K.E., 2012. Comparative performance of conservation agriculture and current smallholder farming practices in semi-arid Zimbabwe. *Field Crops Research*, 132 (2012): 117-128.

Béahir A.B., Mopate L.Y. et Kaboré-Zoungrana C.Y., 2009. Evaluation de la disponibilité saisonnière du fourrage ligneux en zone soudanienne du Tchad: cas du terroir de N'Guetté 1. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 3(1), 2009: 135-146

Bertrand D., 2002. La spectroscopie proche infrarouge et ses applications dans les industries de l'alimentation animale. *INRA Prod. Anim.*, 2002, 15 (3): 209-219

Bidogeza J.C., Berentsen P.B.M., De Graaff J. and Oude Lansink A.G.J.M., 2007. Multivariate typology of farm households based on socio-economic characteristics explaining adoption of new technology in Rwanda. *AAAE Conference Proceedings* (2007): 275-281

Blanchard M., Coulibaly K., Bognini S., Dugué P., Vall E., 2014. Diversité de la qualité des engrais organiques produits par les paysans d'Afrique de l'Ouest : quelles conséquences sur les

recommandations de fumure? *Biotechnologie Agronomie Société Environnement*, 2014, 18 (4): 512-523.

Bocquier F. and González-García E., 2010. Sustainability of ruminant agriculture in the new context: feeding strategies and features of animal adaptability into the necessary holistic approach. *Animal* (2010), 4:7, pp 1258-1273.

Bonaudo T., Bendahan A. B., Sabatier R., Ryschawy J., Bellon S., Leger F., Magda D., Tichit M., 2014. Agroecological principles for the redesign of integrated crop-livestock systems. *European Journal of Agronomy* : 57 (204), 43-51

Bouajila K., Ben Jeddi F., Taamallah H., Jedidi N., Sanaa M., 2014. Effets de la composition chimique et biochimique des résidus de cultures sur leur décomposition dans un sol Limono-Argileux du semi aride. *J. Mater. Environ. Sci.* 5 (1) (2014): 159-166

Boyer J., 1978. Le calcium et le magnésium dans les sols des régions tropicales humides et subhumides. *ORSTOM* (1978). 173 p.

Breman H., 1998. La production fourragère et l'utilisation optimale des éléments nutritifs. L'intensification agricole au Sahel. Editions Karthala. Eds Breman H. et Sissoko K. Pp 167-170.

Breman H., Coulibaly D. & Coulibaly Y., 1998. Amélioration des parcours et production animale; rôle des légumineuses en Afrique de l'Ouest. L'intensification agricole au Sahel. Ed. Khartala, 1998. Eds Breman H. et Sissoko K.: 459-498

Breman, H. & J.J. Kessler, 1995. Woody plants in agro-ecosystems of semi-arid regions with an emphasis on the Sahelian countries, *Advanced Series in Agricultural Sciences* 23. Springer-Verlag, Berlin. 340 p

Bulakali B.P., Aloni J., Palata J.C. et Mergeai G., 2013. Evaluation des performances de la production de graines par tamisage manuel du sol chez trois variétés de *Stylosanthes guianensis* (Aublet) Swartz, dans les conditions du Plateau des Batéké (RDC). *Tropicultura*, 2013, 31, 4. Pp 253-259

Buldgen A., Piraux M., Compère R., 1995. Réhabilitation des terres et synergie agriculture-élevage au sein de systèmes de production modernisés en région sahélo-soudanienne sénégalaise. – L'homme peut-il refaire ce qu'il a défait ? Colloque et congrès «Sciences et changements planétaire / Sécheresse». Editions John Libbey Eurotext, 1995 (Paris) : 389-401.

Camara A., Dieng A., Mergeai G., 2018. Analyses prospectives des possibilités d'amélioration durable des performances des exploitations agricoles de l'ouest du Bassin Arachidier du Sénégal : cas des producteurs de *Jatropha* (*Jatropha curcas* L.). *Tropicultura* (2018) 36, 4: 658-672.

Cameron D.F., Trevorrow R.M. and Liu C.J., 1997. Recent advances in studies of anthracnose of *Stylosanthes*. II. Approaches to breeding for anthracnose resistance in *Stylosanthes* in Australia. *Tropical Grasslands* (1997), Vol. 31. Pp 424-429

Chakraborty S., 2004. Anthracnose disease of *Stylosanthes*. High-yielding anthracnose-resistant *Stylosanthes* for agriculture systems. Ed. Chakraborty Sukumar. Australian Centre for International agricultural Research Canberra, 2004. Pp: 113-124

Chandra A., 2009. Diversity among *Stylosanthes* species: Habita, edaphic and agro-climatic affinities leading to cultivar development. *Journal of Environmental Biology* July 2009, 30(4). Pp 471-478

Chia E., 2004. Principes, méthodes de la recherche en partenariat: une proposition pour la traction animale. *Revue Elevage et Médecine vétérinaire des Pays tropicaux*, 2004, 57 (3-4) : 233-240.

Chivenge P.P., Murwira H.K., Giller K.E., Mapfumo P., Six J., 2007. Long-term impact of reduced tillage and residue management on soil carbon stabilization: Implications for conservation agriculture on contrasting soils. *Soil & Tillage Research* 94 (2007): 328-337.

Coly I., Diop B. et Akpo L.E., 2013. Transformation locale des résidus de récolte en fumier de ferme dans le terroir de la Néma au Saloum (Sénégal). *Journal of Applied Biosciences*, 70: 5640-5651.

Compaoré E., Fardeau J.C., Morel J.L., Sedogo, M.P. 2001. Le phosphore biodisponible des sols: une des clés de l'agriculture durable en Afrique de l'Ouest. *Cahiers d'Etudes et de Recherche Francophone/Agriculture*, 10(2): 81-85.

Corbeels M., de Graaff J., Ndah T.H., Penot E., Baudron F., Naudin K., Andrieu N., Ghirat G., Schuler J., Nyagumbo I., Rusinamhodzi L., Traore K., Mzoba H.D., Adolwa I.S., 2014. Understanding the impact and adoption of conservation agriculture in Africa: A multi-scale analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 187 (2014): 155-170.

Coulibaly D., 1996. Recherche d'un modèle d'exploitation de *Stylosanthes hamata* en banque fourragère et en pâturage amélioré. Thèse de doctorat : Institut d'Économie Rurale, Bamako (Mali), AB-DLO (1996). 122 Pages

Couty P., 1991. L'agriculture africaine en réserve. Réflexions sur l'innovation et l'intensification agricoles en Afrique tropicale. Cahiers d'études africaines. Vol. 31 N°121-122. 1991. Pp 65-81

Craswell E.T. and Lefroy R.D.B., 2001. The role and function of organic matter in tropical soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61 (2001): 7-18

Demande N., 2011. Diagnostic du fonctionnement des principaux systèmes de production agricoles du village de Dantakhouné dans le département de Foundiougne, au Sénégal. Mémoire de fin d'étude de Master Bioingénieur en Sciences Agronomiques, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège (Belgique). 84 p.

Dièye P.N. et Guèye M., 1998. Les systèmes agriculture-élevage au Sénégal: Importance, caractéristiques et contraintes. Report from the Workshop on Crop-Livestock in the Dry Savannas of West and Central Africa held at IITA, Ibadan, 22-27 November 1998. Pp 127-152

Djamen Nana P., Andrieu N., Zerbo I., Ouédraogo Y., Le Gal P-Y., 2015. Agriculture de conservation et performances des exploitations agricoles en Afrique de l'ouest. *Cahier Agriculture*, vol. 24, n°2, 2015: 113-122.

Dione M., Diop O., Dièye P.M., Ndiaye Ba D. et Ndao B., 2008. Caractérisation et typologie des exploitations agricoles familiales du Sénégal – Bassin arachidier. Etudes et documents (Tome 3). ISRA, vol. 8, n°3. ISSN 0850-8933. 31 p.

Dominguez A., Bedano J.C., Becker A.R., 2010. Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil & Tillage Research*, 110 (2010): 51-59

Dos Santos Ribiero M. de F., Benassi D.A., Triomphe B., 2015. Concevoir des systèmes de culture adaptés aux agricultures familiales. Le cas du semis direct dans l'État de Parana (Brésil). *Cahier Agriculture*, Vol. 24, n°2, 2015: 69-75

Doso Jnr S., 2014. Land degradation and agriculture in the Sahel of Africa: causes, impacts and recommendations. *J. Agric. Sci. Appl.*, Vol.3, Issue 3: 67 - 73

Dugué P., Olina Bassala J.P., 2015. Processus d'innovation et recomposition des territoires agricoles : le cas du semis sous couvert végétal au nord du Cameroun. *Cahier Agriculture*, vol. 24 : 93-101.

Erenstein O., 2003. Smallholder conservation farming in the tropics and sub-tropics: a guide to the development and dissemination of mulching with crop residues and cover crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 110 (2003) : 17-37.

Faure G., Gasselin P., Triomphe B., Temple L. et Hocdé H., 2010. Innover avec les acteurs du monde rural: la recherche-action en partenariat. Éditions Quæ, CTA, Presses agronomiques de Gembloux (2010). 221 pages

Feller C., Chopart J.L. et Dancette F., 1987. Effet de divers modes de restitution de pailles de mil sur le niveau et la nature du stock organique dans deux sols sableux tropicaux (Sénégal). *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, vol. 24, n° 3(1987): 237-252.

Fernandes P., Olivier R. and Diatta S., 2000. Changes in organic matter of a ferrallitic tropical soil degraded by cropping systems: the case of Southern Senegal. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 14 (2000): 137-150.

Ganry F. et Badiane A., 1998. La valorisation agricole des fumiers et des composts en Afrique soudano-sahélienne Diagnostic et perspectives. *Agriculture et développement*, N°18, Juin 1998: 73-80.

Gardener C.J., Freire L.C.L., and Murray R.M., 1988. Effect of superphosphate application on the nutritive value of *Stylosanthes* spp. - Native grass pasture for cattle. 1. Composition of the diet selected. *Proc. Aust. Soc. Anim. Prod.* vol. 17. Pp 190-193

Gaye M., 1998. Les politiques d'ajustement dans le secteur agricole sénégalais : analyse critique des implications sur la filière arachidière. Thèse de doctorat. Université Catholique de Louvain, Faculté Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen, Departement Agrotechniek en-Economie. Louvain, Belgique. 225 pages.

Goussard J.J., et Labrousse R., 2008. Des écosystèmes entre conservation, production et gestion dans la durée. Devèze J. C., éd. Défis agricoles africains. Ed. Karthala: 73-98.

Graaff J., Kessler A., Nibbering J.W., 2011. Agriculture and food security in selected countries in Sub-Saharan Africa: diversity in trends and opportunities. *Food Security*, 3 (2011) : 195-213.

Groot J. J. R., Koné D. & De Willigen P., 1998. Utilisation des engrais chimiques pour l'intensification durable de l'agriculture. L'intensification agricole au Sahel. Ed. Khartala, 1998. Eds Breman H. et Sissoko K. : 35-49

Groot J.J.R., Hassink J., Koné D., 1998a. Dynamique de la matière organique du sol L'intensification agricole au Sahel. Ed. Khartala, 1998. Eds Breman H. et Sissoko K.: 243-263

Groot J.J.R., Koné D. & De Willigen P., 1998. Utilisation des engrais chimiques pour l'intensification durable de l'agriculture. L'intensification agricole au Sahel. Ed. Khartala, 1998. Eds Breman H. et Sissoko K.: 35-49.

Groot J.J.R., Traoré M., Koné D., 1998b. Description du système racinaire de trois espèces fourragères en zone soudano-sahélienne: *Andropogon gayanus*, *Vigna unguiculata* et *Stylosanthes hamata*. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 1998 2 (2). Pp 106-119

Guérin H., Sall C., Friot D., Ahokpe B., Ndoye A., 1985. Ébauche d'une méthodologie de diagnostic de l'alimentation des ruminants domestiques dans un système agropastoral : l'exemple de Thyssé - Kaymor - Sonkorong au Sénégal. Communication présentée au séminaire « Relations Agriculture Elevage ». DSA-CIRAD - Montpellier - 10-13 septembre 1985. Pp 60 – 69

Hauswirth D., Pham T.S., Wery J., Tittonell P., Jourdain D., Affholder F., 2015. Apport des typologies d'exploitations aux démarches de conception en agriculture de conservation: une étude de cas dans le nord du Vietnam. *Cahier Agriculture*, vol. 24, n°2, 2015: 102-112.

Havard M., Fall A. et Njoya A., 2004. La traction animale au cœur des stratégies des exploitations agricoles familiales en Afrique subsaharienne. *Revue Élev. Méd. vét. Pays trop.*, 2004, 57 (3-4): 183-190

Hothorn T., Homik k., Zeileis A., 2006. Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework. *J. Comput. Graph. Stat.* **15**, 651–674. doi:10.1198/106186006X133933

http://www.ntipsoft.com/domaine_200/pdf/etude_sur_evolution_du_secteur_agricole.pdf Consulté le 23/10/2017

Husson O., Charpentier H., Razanamparany C., Moussa N., Michellon R., Naudin K., Razafintsalama H., Rakotoarinivo C., Rakotondramanana & Séguy L., 2008. *Stylosanthes guianensis*. In : Fiches techniques plantes de couverture : Légumineuses pérennes. Manuel pratique du semis direct à Madagascar. Volume III. Chapitre 3. § 2.1, CIRAD, TAFA, GSDM, afd, Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche, 11p.

Johansen C., Haque M.E., Bell R.W., Thierfelder C., Esdaile R.J., 2012. Conservation agriculture for small holder farming: Opportunities and constraints of new mechanized seeding systems. *Field Crops Research* 132 (2012): pp 18-32

Jones M. J., Fielding A., Sullivan M., 2006. Analysing extinction risk in parrots using decision trees. *Biodivers. Conserv.* **15**, 1993–2007. doi:10.1007/s10531-005-4316

Jouve P., 1986. Quelques principes de construction de typologies d'exploitations agricoles suivant différentes situations agraires. *Cahiers Recherche Développement*, n° 11 (1986): 48-56.

Kaasschieter G.A., Coulibaly Y., Heitkönig I.M.A. & Ketelaars J.J.M.H., 1998. La supplémentation du bétail: une nécessité! L'intensification agricole au Sahel. Ed. Khartala, 1998. Eds Breman H. et Sissoko K.: 79-105

Kanté S., Smaling E.M.A, van Keulen H., 2007. Nutrient balances for different farm types in Southern Mali, 2007. A. Bationo (eds.), *Advances in integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities*: 557-566.

- Kelemu S., Miles J.W. and Rao I.M., 2004.** Biotic and abiotic constraints to *Stylosanthes* production. High-yielding anthracnose-resistant *Stylosanthes* for agriculture systems. Ed. Chakraborty Sukumar. Australian Centre for International agricultural Research Canberra, 2004. Pp: 96-111
- Khouma M., Guèye M., Ganry F., Badiane A., Ndiaye J-P., Sène M., 2005.** Les Sols. – Bilan de la recherche agricole et agroalimentaire au Sénégal (1964-2004). ISRA, ITA, CIRAD. Pp 73-90
- Koulibaly B., Dakuo D., Ouattara A., Traoré O., Lompo F., Zombré P.N. & Yao Kouamé A., 2015.** Effets de l'association du compost et de la fumure minérale sur la productivité d'un système de culture à base de cotonnier et de maïs au Burkina Faso. *Tropicicultura*, 2015, 33,2: 125-134
- Koulibaly B., Traoré O., Dakuo D., Zombré P.N. & Bondé D., 2010.** Effets de la gestion des résidus de récolte sur les rendements et les bilans culturaux d'une rotation cotonnier-maïs-sorgho au Burkina Faso. *Tropicicultura*, 2010, 28, 3: 184 - 189
- Lahmar R., Bationo B.A., Dan Lamso N., Guéro 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 (2012) : 158-167.
- Landais E. et Lhoste P., 1990.** L'association agriculture-élevage en Afrique intertropicale: un mythe techniciste confronté aux réalités du terrain. *Cah. Sci. Hum.* 26 (1-2) 1990. Pp 277-235.
- Landais E. et Lhoste P., 1993.** Système d'élevage et transfert de fertilité dans la zone de savane africaine. 2- Les systèmes de gestion de la fumure animale et leur insertion dans les relations entre l'élevage et l'agriculture. *Cahiers agriculture*, 1993 (2): 9-25.
- Lhoste P., 1987.** L'association agriculture-élevage, évolution du système agropastoral au Sine Saloum (Sénégal), Maisons-Alfort, IEMVT. 314 pages
- Lhoste P., 2004.** Les relations agriculture-élevage. *OCL Vol. 11, n° 4/5, Juil.-Oct. (2004): 253-255.*
- Lhoste P., Richard D., 1993.** Contribution de l'élevage à la gestion de la fertilité à l'échelle du terroir. Colloque 10^{ème} Journées du réseau érosion, Montpellier (FRANCE), 15-18/09/1993: 463-489.
- Lukkananukool A., Paengkoum P., Bureenok S. and Paengkoum S., 2013.** Effect of forage species and additives on quality of tropical forage silage. *Journal of Animal and Veterinary Advances* 12(2): 153-159
- MAER, 2009.** Rapport de l'étude sur l'évolution du secteur agricole, des conditions de vie des ménages et de la vie chère au Sénégal. 116 p. Source :
- Maindonald J., Braun J., 2007.** Cambridge series in statistical and probabilistic mathematics. In *Data analysis and graphics using R: an example based approach*. New York, NY: Cambridge University Press.
- Mathieu C., Pieltain F., 1940.** Analyse chimique des sols - Méthodes choisies. Ed. Tec & Doc (2003), Paris, France, 387 p.
- McIvor J.G., 1979.** Seasonal changes in nitrogen and phosphorus concentrations and *in vitro* digestibility of *Stylosanthes* species and *Centrosema pubescens*. *Tropical Grasslands Vol. 13, N° 2, July 1979.* Pp 92-97
- Meinke H., Baethgen W.E., Carberry P.S., Donatelli M., Hammer G.L., Selvaraju R., Stöckle C.O., 2001.** Increasing profits and reducing risks in crop production using participatory systems simulation approaches. *Agricultural Systems* 70 (2001): 493-513.
- Milleville P. et Serpantié G., 1994.** Intensification et durabilité des systèmes agricoles en Afrique soudano-sahélienne. Promotion des systèmes agricoles durables dans les pays d'Afrique soudano-sahélienne : Dakar, Sénégal, 10-14 janvier Séminaire régionale organisé par la FAO et le CIRAD. Publisher : Rome, FAO, 1994. Pp 33-45
- Morse S. and Mc Namara N., 2003.** Factors affecting the adoption of leguminous cover crops in Nigeria and comparison with the adoption of new crop varieties. *Expl. Agric.*, Vol. 39 (2003) : 81-97.
- Munaut F., Hamaide N., Vander Stappen J. and Maraite H., 1998.** Genetic relationships among isolates of *Colletotrichum gloeosporioides* from *Stylosanthes* spp. in Africa and Australia using RAPD and ribosomal DNA markers. *Plant Pathology* (1998) 47. Pp 641-648
- Nacro S., Ouedraogo S., Traoré K., Sankara E., Kaboré C. et Ouattara B., 2010.** Effets comparés des pratiques paysannes et des bonnes pratiques agricoles de gestion de la fertilité des sols

sur les propriétés des sols et les rendements des cultures dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(4):1044-1055.

Nicholls C. I. and Altieri M. A., 2018. Pathways for the amplification of agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 42 : 10, 1170-1193, DOI : 10.1080/21683565.2018.1499578

Odunze A.C., 2002. Mulching practice in a semi-arid zone of Nigeria for soil erosion control and grain yield of maize. *Journal of Sustainable Agriculture*, Vol. 20(2) 2002: 31-40.

Ogunbode S.M. and Akinlade J.A., 2012. Effect of three species of *Stylosanthes* on the performance of west African dwarf sheep. *Fountain Journal of Natural and Applied Sciences*: 2012 (1) 1. Pp 36 - 40.

Omole A.J., Adejuyigbe A., Ajayi F.T. and Fapohunda J.B., 2007. Nutritive value of *Stylosanthes guianensis* and *Lablab purpureus* as sole feed for growing rabbits. *African Journal of Biotechnology* Vol. 6 (18). Pp 2171-2173

Onana J., Mvondoze A., Sadou I., Asongwed Awa A., Mainam F., Guibert H., Awono Mvondo J.P. et Nchembi Tarla F., 2007. Impact des légumineuses fourragères et/ou de couverture sur la biodiversité floristique au Nord-Cameroun. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 1 (2): 165-175

Onyeonagu C.C. and Asiegbu J.E., 2013. Harvest frequency effect on plant height, grass tiller production, plant cover and percentage dry matter production of some forage grasses and legumes in the derived savannah, Nigeria. *African Journal of Agricultural Research*, Vol. 8(7): 608-618.

Osafo E.L.K., Attah-Kotoku V., Oppong-Anane K. and Fynn K., 2008. Performance characteristics of lactating djallonké ewes fed rice straw basal diets supplemented with *Stylosanthes hamata*. *Journal of Science and Technology*, Vol. 28, N° 1. Pp 57-64

Pallo F.J.-P., Asimi S., Assa A., Sedogo P.M. et Sawadogo N., 2006. Statut de la matière organique des sols de la région sahéenne du Burkina Faso. *Etude et Gestion des Sols*, Vol. 13, 4, 2006. Pp 289-304

Penot E., Domas R., Fabre J., Poletti S., Macdowall C., Dugu P., Le Gall P.Y., 2015. Le technicien propose, le paysan dispose. Le cas de l'adoption des systèmes de culture sous couverture végétale au lac Alaotra, Madagascar. *Cahier Agriculture*, vol. 24, N° 2 (2015): 84-92.

Petit M.S., Reau R., Dumas M., Moraine M., Omon B. Josse S., 2012. Mise au point de systèmes de culture innovants par un réseau d'agriculteurs et production de ressources pour le conseil. *Innovations Agronomiques*, 20 (2012) : 79-100.

Phiri M.S., Ngongoni N.T., Maasdorp B.V., Titterton M., Mupangwa J.F., Sebata A., 2007. Ensiling characteristics and feeding value of silage made from browse tree legume-maize mixture. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, Vol. 7, n° 3, 2007. Pp 149-156

Pieri C., 1989. Fertilité des terres de savanes, bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Coopération, CIRAD-IRAT, Montpellier, France, 444p.

Piriaux M., 2000. Intensification et diversification des systèmes de production en situation à risques – Cas de la région centrale du bassin arachidier sénégalais. Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique. Communauté française de Belgique, Faculté universitaire des sciences agronomiques de Gembloux, unité de Zootechnie. 247 pages

Piriaux M., Buldgen A., Steyaert P. et Dieng A., 1997. Intensification agricole en région sahélo-soudanienne. 1. Itinéraires techniques dans un contexte à risques. *Biotechnologie Agronomie Société Environnement*, 1997, 1 (3): 196-208.

Pretty J., Toulmin C. & Williams S., 2011. Sustainable intensification in African agriculture. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 9:1 (2011), 5-24.

Razafimbelo T.M., Albrecht A., Basile I., Borschneck D., Bourgeon G., Feller C., Ferrer H., Michellon R., Moussa N., Muller B., Oliver R., Razanamparany C., Seguy L. et Swarc M., 2006. Effet de différents systèmes de culture à couverture végétale sur le stockage du carbone dans un sol argileux des Hautes Terres de Madagascar. *Etude et Gestion des Sols*, Vol. 13, 2, 2006. Pp 113-127

Ribeiro M.F.S., Benassi D.A., Triomphe B., 2015. Concevoir des systèmes de culture adaptés aux agricultures familiales. Le cas du semis direct dans l'État du Parana (Brésil). *Cahier Agriculture*, Vol. 24, N° 2 (2015): 69-75.

Saito K., Azoma K., Oikeh S.O., 2010. Combined effects of *Stylosanthes guianensis* fallow and tillage management on upland rice yield, weeds and soils in southern Benin. *Soil & Tillage Research* 107 (2010). Pp 57-63

Sakho J.M.S., 2009. L'autonomie alimentaire par la diversification des activités: le cas des ménages agricoles du bassin arachidier au Sénégal. Thèse de Docteur à l'Université de Montpellier 1 (Faculté des Sciences Economiques), soutenu publiquement le 15 janvier 2009, 241p.

Schlecht E., Buerkert A., Tielkes E. and Bationo A., 2007. A critical analysis of challenges and opportunities for soil fertility restoration in Sudano-Sahelian West Africa. A. Bationo (eds.), *Advances in integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities*: 1-28.

Sempore A.W., Andrieu N., Le Gal P.Y., Nacro H.B., Vall E., Sedogo M., 2013. Quelles stratégies pour améliorer l'intégration agriculture-élevage dans des exploitations de savane ouest-africaine ? Approches par simulation avec les producteurs. Conférence AGRAR – 2013. Yamoussokro (Côte d'Ivoire) du 04 au 06 juin 2013. 18 p.

Shepherd K.D., Ohlsson E., Okalebo J.R., Ndufa J.K., 1996. Potential impact of agroforestry on soil nutrient balances at the farm scale in the East African Highlands. *Fert. Res.* 44 : 97-99

Smith F.W., Jackson W.A. and Vanden Berg P.J., 1990. Internal phosphorus flows during development of phosphorus stress in *Stylosanthes hamata*. *Aust. Journ. Plant Physiol.*, 17. Pp 451-464

Sossa E.L., Amadji G.L., Vissoh P.V., Hounsou B.M., Agbossou K.E. et Hounhouigan D.J., 2014. Caractérisation des systèmes de culture d'ananas (*Ananas comosus* (L.) Merrill) sur le plateau d'Allada au Sud-Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 8(3): 1030-1038.

Stessens J., 2002. Analyse technique et économique des systèmes de production agricole au nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat N° 530 - Faculté des Sciences Biologiques Appliquées de la KULeuven: 286p.

Sukumar C., R. T. Mervyn and Nick E., 1996. A multivariate analysis of pathogenic variation in *Colletotrichum gloeosporioides* infecting the tropical pasture legume, *Stylosanthes scabra*. *Ecology and Epidemiology*, Vol. 86, N° 3. Pp 283-289

Sumberg J., 2002. The logic of fodder legumes in Africa. *Food Policy*, 27 (2002): 285-300.

Sungthongwises K., Poss R. and Drevon J.J., 2011. Effects of P on *Vigna unguiculata* cv. 305 and *Stylosanthes hamata* cv. Verano symbiosis in the field of rubber-tree plantation. *Asian Journal of Plant Sciences* 10(7). Pp 357-364

Tarawali G., 1998. Improving crop-livestock systems in the dry savannas of west and central Africa. Report from the Workshop on Crop-Livestock in the Dry Savannas of West and Central Africa held at IITA, Ibadan, 22-27 November 1998. Pp 23 – 42

Tittonell P., Muriuki A., Shepherd K.D., Mugendi D., Kaizzi K.C., Okeyo J., Verchot L., Coe R., Vanlauwe B., 2010. The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa - A typology of smallholder farms. *Agricultural Systems*, 103 (2010): 83-97.

Tittonell P., Vanlauwe B., Leffelaar P.A., Rowe E.C., Giller K.E., 2005. Exploring diversity in soil fertility management of smallholder farms in western Kenya - Heterogeneity at region and farm scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 110 (2005): 149-165.

Tojo Soler C.M., Bado V.B., Traoré K., Mc Nair Bostick W., Jones J.W. and Hoogenboom G., 2011. Soil organic carbon dynamics and crop yield for different crop rotations in a degraded ferruginous tropical soil in a semi-arid region: a simulation approach. *Journal of Agricultural Science* (2011), 149, 579–593. doi:10.1017/S0021859611000050

Toutain B., Klein H.-D., Lhoste P. et Duteurtre G., 2009. Histoire et avenir des cultures fourragères en Afrique tropicale. *Fourrages* (2009) 200. Pp 511-523

Toutain B., Peyre de Fabrègues B., Roberge G., Bigot A., Rippstein G., 1992. Revue des travaux de recherche, de vulgarisation et d'utilisation effectuée sur stylosanthes en Afrique de l'ouest. In: De Leeuw P. N., Mohamed-Saleem M. A. and Nyamu A. M., eds. *Stylosanthes as a forage and fallow crop*. Proceedings of the Regional Workshop on the Use of *Stylosanthes* in West Africa held in Kaduna, Nigeria, 26-31 October 1992. 346 pp

Traoré S., Coulibaly B.S., Koné A., Bagayoko M. and Kouyaté Z., 2007. Increasing the productivity and sustainability of millet based cropping systems in the Sahelian zones of West Africa. A. Bationo (eds.), *Advances in integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and opportunities*: 567-574.

Vall E., Chia E., Blanchard M., Koutou M., Coulibaly K. et Andrieu N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cah. Agric.* 2016, 25, 15001 - DOI: 10.1051/cagri/2016001. 7 pages

Van der Linden M., 2011. Identification des sols et évaluation de leurs contraintes et potentialités pour la culture de *Jatropha curcas* L. en milieu paysan dans l'Ouest du bassin arachidier sénégalais. Mémoire de fin d'étude de Master Bioingénieur en Sciences et technologie de l'environnement, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège (Belgique). 92p.

Van Zanten H. H. E., Van Ittersum M. K., De Boer I. J. M., 2019. The role of farm animals in a circular food system. *Global Food Security*, 21 (2019) : 18-22.

Verachtert E., Govaerts B., Lichter K., Sayre K.D., Ceballos-Ramirez J.M., Luna-Guido M.L., Deckers J., Dendooven L., 2009. Short term changes in dynamics of C and N in soil when crops are cultivated on permanent raised beds. *Plant Soil* 320 (2009): 281-293.

Waneukem V. et Ganry F., 1992. Relations entre les formes d'azote organique du sol et l'azote absorbé par la plante dans un sol ferrallitique du Sénégal. *Cahier ORSTOM, Série Pédologie*, vol. 27, n° 1, (1992): 97-107

Whitbread AM., Robertson M.J., Carberry P.S., Dimes J.P., 2010. How farming systems simulation can aid the development of more sustainable smallholder farming systems in southern Africa. *European journal of agronomy*, 32 (2010): 51-58.

Zahran H. H., 1999. *Rhizobium*-Legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in arid climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Dec., 1999. Pp 968-989

Zibilske L.M., Bradford J.M., Smart J.R., 2002. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil & Tillage Research* 66 (2002) : 153-163.