



**HAL**  
open science

**ETUDE ET MODELISATION DE LA  
PRODUCTIVITE DES SYSTEMES DE CULTURE  
BASES SUR LE SEMIS DIRECT SOUS COUVERT  
VEGETAL DANS LA SAVANE DU SUD-OUEST DE  
LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO, “  
CAS DE MVUAZI ”**

Gertrude Pongi Khonde

► **To cite this version:**

Gertrude Pongi Khonde. ETUDE ET MODELISATION DE LA PRODUCTIVITE DES SYSTEMES DE CULTURE BASES SUR LE SEMIS DIRECT SOUS COUVERT VEGETAL DANS LA SAVANE DU SUD-OUEST DE LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO, “ CAS DE MVUAZI ”. Agronomie. Université Pédagogique Nationale (UPN) Kinshasa (Congo), 2021. Français. NNT: . tel-03604999

**HAL Id: tel-03604999**

**<https://hal.science/tel-03604999>**

Submitted on 10 Mar 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET UNIVERSITAIRE  
UNIVERSITE PEDAGOGIQUE NATIONALE  
B.P. 8815 KINSHASA 1  
FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES  
DEPARTEMENT DE PHYTOTECHE**

**THESE DE DOCTORAT N°...**

**Domaine** : Sciences Agronomiques

**Spécialité** : Agronomie-Systèmes de culture

Présentée et soutenue publiquement

Par

**Gertrude PONGI KHONDE,**

**Ir. Diplômé d'Etudes Approfondies**

Le 09 septembre 2021

**ETUDE ET MODELISATION DE LA PRODUCTIVITE DES  
SYSTEMES DE CULTURE BASES SUR LE SEMIS DIRECT SOUS  
COUVERT VEGETAL DANS LA SAVANE DU SUD-OUEST DE LA  
REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO,  
« CAS DE MVUAZI »**

**JURY**

Président : Professeur Nathan-Fernand NYONGOMBE UTSHUDIENYEMA (UPN)

Secrétaire : Professeur Amand MBUYA KANKOLONGO (UPN)

Membres effectifs : - Professeur Antoine MUMBA DJAMBA (UPN) : Promoteur

- Professeur Roger KIZUNGU VUMILIA (UNIKIN) : Co-promoteur
- Professeur Constant KABWE NKONGOLO (ULO/ Canada) : Co-promoteur

Membres suppléants : - Professeur Gilbert PULULU MFUIDI NITU (ISP-Gombe)

- Professeur Adrien KALONJI MBUYI (UNIKIN)

**Septembre 2021**

## EPIGRAPHE

*« Pour faire servir la nature aux besoins de l'homme,  
il faut obéir à ses lois »*

*Francis Bacon*

## REMERCIEMENTS

Avant de présenter les résultats de ma thèse, je souhaite remercier toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à sa réalisation.

Cette recherche est le fruit d'une collaboration fructueuse de l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques (INERA) avec l'institution partenaire l' « International Institut of Tropical Agriculture » (IITA/Ibadan, Nigeria) qui a été initiée par le Dr STEFAN HAUSER dans le cadre de recherche sur les systèmes de culture d'association céréales-légumineuses à l'INERA/Mvuazi

Je veux remercier mon Promoteur de thèse Professeur Antoine MUMBA DJAMBA pour m'avoir permis de réaliser ce projet. Je le remercie sincèrement pour ses conseils, son soutien, tout particulièrement dans la phase de rédaction du manuscrit et pour m'avoir beaucoup appris sur le métier de la recherche. Il a également su trouver les bons outils pédagogiques pour me faire progresser lors de la rédaction de cette thèse.

Je remercie le Professeur Constant KABWE NKONGOLO de l'Université Laurentienne d'Ontario au Canada, pour sa ferveur et son dévouement particulier dans l'achèvement de cette thèse, malgré toutes les péripéties rencontrées tout au long de sa finalisation. Je remercie également le Professeur Roger KIZUNGU VUMILIA pour tous les conseils et les critiques toujours constructifs qu'il a pu m'apporter pour le bon déroulement de la thèse.

Je remercie aussi le Professeur Amand MBUYA KANKOLONGO, notre Chef du Programme National Maïs ainsi que notre Directeur Général de l'INERA, pour avoir participé activement à la réflexion sur mon travail tout au long de la thèse.

Je tiens à remercier particulièrement l'équipe technique du Programme National Maïs, pour leurs idées pertinentes qu'ils ont pu m'apporter dans l'élaboration des protocoles de mesures ainsi que pour leur aide très précieuse dans la réalisation des prélèvements des données au champ. Je souhaite aussi exprimer toute ma gratitude à tout le personnel scientifique et technique pour leur aide et leur contribution au bon déroulement des expérimentations.

Merci à tous mes collègues et mes amis qui m'ont entourée durant toutes ces années et qui n'ont pas cessé de m'encourager, merci à tous pour votre soutien.

Je ne sais comment remercier mon mari Professeur Jean-Pierre KABONGO TSHIABUKOLE pour m'avoir supportée au quotidien pendant toute cette période. Merci pour ta confiance en moi, ton optimisme sans limites ainsi que le soutien sans failles que tu as pu m'apporter. Sans toi, je sais que je n'aurais jamais pu dépasser toutes les épreuves que j'ai rencontrées sur mon chemin. Je remercie aussi tous mes enfants (Nicolas-Jérôme, Charles, Octavie et Jean-Pierre Jr) pour leur amour et leur tolérance, malgré toutes les difficultés rencontrées tout au long de ce travail.

Un grand merci à mes parents Jérôme et Octavie PONGI, à mes frères Jérôme PONGI (sa femme Chantal et ses enfants Marie-Giselle, Michel-Ange et Pèlerine) et Roger PONGI (sa femme Rose et ses enfants David, Jonathan et Marie-Corinne) qui m'ont toujours encouragée et soutenue dans mes choix. Je ne vous remercierai jamais assez de m'avoir toujours poussée à aller le plus loin possible. Je remercie aussi profondément ma belle famille, mes beaux parents François et Marguerite TSHIABUKOLE, mes beaux-frères François TSHIENDA TSHIABUKOLE (sa femme Claudine ainsi que ses enfants William et Jean-Luc), Gustave MALUMBA TSHIABUKOLE (et sa femme Annie), Erick BAYAMBA TSHIABUKOLE et mes belles-sœurs Charlotte MBIYA TSHIABUKOLE (sa fille Margueritte Zoé), Anne-Marie Gracia NTSHILA TSHIABUKOLE et Mireille KANYEBA TSHIABUKOLE (son mari Baron et leur fils Jason), pour leur soutien spirituel et moral au quotidien.

Que toutes ces personnes reçoivent ici l'expression de ma profonde gratitude.

## RESUME

En agriculture de conservation, le système de semis direct sous couvert végétal mort ou vif (SCV), qui est une nouvelle approche de l'agriculture qui s'inspire de l'écosystème forestier, assure une bonne productivité des surfaces cultivées et donne beaucoup d'avantages dans la gestion du sol. Si les systèmes de culture en association et en rotation se sont bien développés en climat tropical, leurs performances sont souvent très variables et les processus impliqués dans le fonctionnement de ces systèmes demeurent peu connus.

Cette thèse se propose d'accroître les connaissances scientifiques sur le fonctionnement des systèmes de culture d'association et de rotation dans un sol non travaillé, des cultures de rente prise en compte qui sont le maïs comme céréale ainsi que le niébé et le soja comme légumineuses en zone tropicale dans la savane du sud-ouest de la RD Congo, précisément à l'INERA/Mvuazi. Le travail repose sur une série d'expérimentations sur les SCV proposant de nouveaux systèmes de culture pouvant répondre à une triple attente : la productivité agricole, la rentabilité économique et le respect de l'environnement.

Nos résultats ont confirmé l'intérêt de ces systèmes pour améliorer le rendement des cultures de maïs en association et en rotation avec des légumineuses sur la base des principes de fonctionnement des SCV par la détermination de la combinaison optimisant la production en grains et la biomasse totale du système. La production de soja mis en association avec le maïs s'est révélée plus performante par rapport au niébé en association avec le maïs. En rotation avec le niébé, les variétés 09 SADVE F<sub>2</sub>, Mudishi 1, Mudishi 3, VPO 538 et ZM 523 ont doublé, triplé ou quadruplé leurs rendements. Par contre la monoculture successive des variétés de maïs a occasionné de faibles rendements allant jusqu'à des pertes de plus de 5%. Les rendements élevés de chaque culture enregistrée au cours de cette étude ont occasionné des bénéfices importants en augmentant leurs ratios que se soit en culture d'association ou en rotation.

La thèse fournit aussi des informations sur le fonctionnement des cultures d'association mis en intercalaires, à partir de la relation de concurrence établit entre les deux espèces due à une compétition pour l'utilisation optimale des ressources environnementales. Grâce aux indices de compatibilité, une sélection plus avancée des variétés est possible, afin d'identifier les variétés compatibles au système de culture intercalaire et qui sont observés comme les plus rentables. La valeur économique d'une association est plus élevée par rapport à la monoculture du fait que les légumineuses sont plus chères sur le marché, permettant à l'association maïs-légumineuse d'atteindre un niveau de productivité plus élevé par rapport à la monoculture.

Ce travail a aussi contribué au développement d'outils méthodologiques pour étudier le fonctionnement des associations par les rapports des approches mathématiques ou modèles simulant la plantation pour la culture d'association céréale-légumineuse. Montrant ainsi que la compétition qui existe dans la culture mixte pourrait être l'aspect principal affectant le rendement par rapport à l'implantation des monocultures des céréales. Il a été démontré qu'il ya eu une grande compétition pour la lumière sur le soja dans les associations (plus précisément dans l'association en intercalaire) par rapport aux monocultures, et que la réduction de la quantité de lumière reçue par le soja a des effets négatifs sur sa croissance et sur son rendement en grains. La modification de l'arrangement spatial du système de culture d'association en intercalaire vers l'association en bande a permis de réduire la perte de rendement qui était de 78,06% pour l'association en intercalaire à 43,59% pour l'association en bande. Cela démontre que la meilleure combinaison d'espacement des lignes et de densité pour les légumineuses correspond à un indice de surface foliaire (LAI) qui intercepte au moins 95% du rayonnement actif du point de vue de la photosynthèse au début de la phase de remplissage des graines.

**Mots clés : Maïs, Semis direct, Plante de couverture, Associations des cultures, Indices de compétition, Indices de surface foliaire.**

## ABSTRACT

In conservation agriculture, the direct seeding mulch-based cropping systems (DMC), which is a new agriculture approach that is inspired by the forest ecosystem, ensures good cultivated areas productivity and gives a lot of advantages in soil management. If Cereal-legume intercropping and rotation cropping systems are well developed in tropical climates, their performance is often highly variable and the processes involved in the functioning of these systems remain known so far.

This thesis aims to acquire knowledge on the profitability and response of maize crop in intercrop and rotation with legumes based on DMC to determine the optimum combination of yield grain and total grain biomass in the savannah of southwestern DR Congo, at INERA/Mvuazi. It's based on some DMC's experiments proposing new cropping systems that can meet a triple expectation: agricultural productivity, economic profitability and respect of environment. The residual effects of cowpea crops have been shown to have considerably increased maize yield. As for the production of pulses in combination with maize, soybeans were more efficient than cowpeas. All maize varieties each presented a combination that maximized productivity. But 09 SADVE F2, Mudishi 1, Mudishi 3, VPO 538 and ZM 523 have doubled, tripled or quadrupled their yields in rotation with cowpea. Maize sole crop, which produces poor mulch, resulted in low yields in the second season, resulting in losses of more than 5%. The high yields observed in this study resulted in significant benefits in increasing their ratios whether in combination or in rotation.

This thesis concludes that intercropping of maize with cowpea and soybean may affect seed yield, competition between the 2 species (maize and legumes), and economics of mixtures as compared to solitary cropping of the same species. Regardless of various varieties, maize-cowpea or maize-soybean intercropping had the yield advantages of intercropping and optimum exploitation of the environmental resources as opposed to other intercropping systems. Additionally, these 2 intercropping systems were observed to be the most profitable. Furthermore, cowpea intercropped with maize was more competitive than soybean. Generally, maize was the dominant species in all mixtures. Although legumes had lower yield in mixture but are more expensive in markets, solitary planting of them would not reach the profitable level gained with maize or other cereals cited in literature. On the other hand, mixtures with maize and soybean resulted in significant advantages of intercropping as confirmed by the



economic and land use efficiency values. Mudishi 3 variety showed highest aggressivity for cowpea intercrop and lowness competitiveness for soybean intercrop. Mudishi 3-soybean presented the greatest monetary advantage, although the intercrop advantage index was negative. Such a system can be easily practiced especially by peasants from the lower region in DR Congo, as well as in other countries that have similar climate.

This work has also contributed to the development of methodological tools to study the functioning of associations through the ratios of mathematical approaches or models simulating the plantation for the cultivation of cereal-legume association. Thus showing that the competition that exists in mixed cropping could be the main aspect affecting the yield compared to the establishment of cereal monocultures. It has been shown that there was a great competition for light on soybeans in associations (more precisely in the intercropping association) compared to monocultures, and that the reduction in the amount of light received by soybeans was negative effects on its growth and on its grain yield. The modification of the spatial arrangement of the intercropping association culture system towards the strip association made it possible to reduce the yield loss which was from 78.06% for the intercrop association to 43.59% for the 'band association. This demonstrates that the best combination of row spacing and density for legumes is a leaf area index (LAI) that intercepts at least 95% of photosynthetically active radiation at the start of the infill phase seeds.

**Key words: Maize, DMC, Cover crop, Intercropping, Plant competition indices, Leaf area index.**

# Table des matières

Table des matières .....	1
Liste des abréviations et acronymes .....	5
Liste de tableaux.....	6
Liste de figures .....	7
0. Introduction .....	9
0.1. Concepts .....	9
0.2. Problématique.....	12
0.3. Cadre de références théoriques.....	13
0.4. Questions de recherche.....	14
0.5. Hypothèses .....	15
0.5.1. Hypothèse globale .....	15
0.5.2. Hypothèses spécifiques .....	15
0.6. Objectifs du travail .....	16
0.6.2. Objectifs spécifiques .....	16
0.7. Intérêt et Justification de l'étude .....	17
0.8. Méthodologie et outils de collecte de données.....	17
0.9. Structure de la thèse (Organisation et subdivision de la thèse) .....	18
Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et analyse des données disponibles sur le système de culture sous-couvert vegetal, modèle et simulation des cultures associées et le milieu d'étude .....	19
1.1. Le Système de Culture Sous-couvert Végétal (ou SCV).....	19
1.1.1. Introduction .....	19
1.1.2. Historique du SCV .....	20
1.1.3. Principes fondamentaux des écosystèmes cultivés en SCV .....	21
1.1.4. Méthode d'analyse, principes et caractérisation des associations .....	25
<b>1.1.4.1. Méthode d'analyse des associations</b> .....	25
<b>1.1.4.2. Principes généraux sur le fonctionnement des associations</b> .....	26
<b>1.1.4.3. Compétition pour une diversité de ressources</b> .....	27
<b>1.1.4.4. Caractérisation de la compétition</b> .....	29
1.1.5. Espèces et variétés à associer .....	30
1.1.6. Production en culture multiple.....	31
1.1.6.1. Différentes formes de cultures multiples .....	31
1.1.6.2. Système de culture intercalaire maïs-légumineuse .....	32
1.1.6.3. Avantage de l'association maïs-légumineuse .....	33

<b>1.1.6.4.</b>	<b>Association du maïs avec les légumineuses à graines (le niébé et le soja).....</b>	34
<b>1.1.6.5.</b>	<b>Association du maïs avec les légumineuses fourragères.....</b>	36
1.2.	Modèle et simulation des cultures associées .....	36
1.2.1.	Concept de base.....	36
1.2.2.	Définition d'un modèle.....	40
1.2.3.	Types de modèles .....	40
1.2.4.	Simulation des cultures.....	41
<b>1.2.4.1.</b>	<b>Simulation de la surface foliaire.....</b>	41
<b>1.2.4.2.</b>	<b>Simulation de l'indice de surface foliaire .....</b>	43
1.3.	Le milieu d'étude.....	45
1.3.1.	Situation géographique.....	45
1.3.2.	Climat .....	47
1.3.3.	Sol et végétation .....	49
<b>1.3.3.1.</b>	<b>Les sols de Mvuazi.....</b>	49
<b>1.3.3.2.</b>	<b>La végétation.....</b>	51
Chapitre 2 : Evaluation de l'association et de la rotation du maïs avec légumineuses vivrières, en semis direct dans la savanne du sud-ouest de la République Démocratique du Congo, « cas de Mvuazi » ... 53		
2.1.	Introduction .....	53
2.2.	Matériels et méthode .....	54
2.2.1.	Matériels.....	54
2.2.2.	Méthode.....	56
<b>2.2.2.1.</b>	<b>Dispositif expérimental .....</b>	56
<b>2.2.2.2.</b>	<b>Collecte des données.....</b>	57
<b>2.2.2.3.</b>	<b>Analyse économique.....</b>	58
<b>2.2.2.4.</b>	<b>Analyses des données.....</b>	59
2.3.	Résultats .....	59
2.3.1.	Information sur les conditions du sol .....	59
2.3.2.	Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants, la biomasse et le rendement du maïs en première saison.....	60
2.3.3.	Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants, la biomasse et le rendement en graines des légumineuses en première saison.....	61
2.3.4.	Effet du paillis provenant de la rotation sur le rendement, le nombre de plants et des biomasses du maïs en deuxième saison.....	62
2.3.5.	Variation du rendement de maïs en association et en rotation .....	63

2.3.6.	Analyse économique des variétés de maïs en système d'association et de rotation sur paillis de légumineuses.....	65
2.4.	Discussion .....	67
2.5.	Conclusion.....	70
Chapitre 3. Evaluation du rendement et des indices de compétitivité pour les cultures d'association de huit variétés de maïs, du soja et du niébé dans la zone de savane du sud-ouest de la République Démocratique du Congo, « Cas de Mvuazi ».....		
3.1.	Introduction .....	71
3.2.	Matériels et méthode .....	72
3.2.1.	Matériels.....	72
3.2.2.	Méthode.....	73
<b>3.2.2.1.</b>	<b>Dispositif expérimental</b> .....	73
<b>3.2.2.2.</b>	<b>Calcul d'indices de compétitivité</b> .....	73
3.2.3.	Indices des avantages monétaires.....	77
3.2.4.	Analyse des données.....	77
3.3.	Résultats et discussion.....	78
3.3.1.	Le Rendement et l'Indice de « maize equivalent yield ».....	78
3.3.2.	Le taux d'équivalence en superficies cultivées et leur capacité concurrentielle .....	79
3.3.3.	Agressivité, ratio compétitif (CR) et perte de rendement actuel .....	82
3.3.4.	Indices d' "Intercropping advantages" et de "monetary advantage index" .....	83
3.3.5.	Analyses en Composante Principale .....	84
3.4.	Conclusion.....	86
Chapitre 4 : Simulation de l'effet des différents arrangements spatiaux sur la dynamique foliaire du maïs mis en association avec le soja. ....		
4.1.	Introduction .....	87
4.2.	Matériels et méthode .....	88
4.2.1.	Matériels.....	88
4.2.2.	Méthode.....	89
<b>4.2.2.1.</b>	<b>Dispositif expérimental</b> .....	89
<b>4.2.2.2.</b>	<b>Collecte des données</b> .....	89
<b>4.2.2.2.1.</b>	<b>En Phase de croissance</b> .....	89
<b>4.2.2.2.2.</b>	<b>A la récolte</b> .....	90
<b>4.2.2.2.3.</b>	<b>Rendement :</b> .....	90
<b>4.2.2.3.</b>	<b>Indice de surface foliaire (LAI)</b> .....	91

<b>4.2.2.4.</b>	<b>Calcul du temps thermique.....</b>	92
<b>4.2.2.5.</b>	<b>Simulation de la hauteur de plant, du diamètre au collet et de l'expansion foliaire du maïs .....</b>	92
<b>4.2.2.6.</b>	<b>Analyses statistiques des données.....</b>	93
4.3.	Résultats .....	94
4.3.1.	Rendement en grains du maïs et du soja.....	94
4.3.2.	Simulation de la hauteur du maïs .....	94
4.3.3.	Diamètre au collet.....	96
4.3.4.	Simulation de la hauteur des plants du soja.....	97
4.3.5.	Simulation du diamètre au collet de soja.....	99
4.3.6.	Simulation de l'indice de surface foliaire (LAI) .....	100
<b>4.3.6.1.</b>	<b>Simulation de l'indice de surface foliaire du maïs.....</b>	100
<b>4.3.6.2.</b>	<b>Simulation de l'indice de surface foliaire du soja.....</b>	102
4.4.	Discussion .....	104
4.4.1.	Effet de l'association sur le rendement des cultures.....	104
4.4.2.	Simulation de la croissance des cultures .....	104
4.4.3.	Simulation de l'indice de surface foliaire.....	105
4.5.	Conclusion.....	106
Chapitre 5 : Discussion générale .....		107
Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives.....		120
6.1.	Conclusion.....	120
6.2.	Perspectives .....	122
Références bibliographiques .....		124
Références webographiques.....		157
Annexes .....		158

## Liste des abréviations et acronymes

AC :	Agriculture de Conservation
ACP :	Analyse en Composantes Principales
AFD :	Agence Française de Développement.
BNF :	Fixation Biologique de l'Azote
CDSR:	Centre de Développement Sous-Régional
CERES :	Centre de Formation sur l'Environnement et la Société
CGIAR :	Groupe consultatif pour la recherche agricole
CIALCA :	Consortium of Improving Agriculture- based Livelihoods in Central Africa.
CIPEA :	Centre International pour l'Elevage en Afrique
CIRAD-CRI :	Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement
FAO :	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.
FFEM :	Fonds Français pour l'Environnement Mondial.
GOSSYM :	Modélisation du Développement et de la Croissance du Cotonnier
ICRISAT :	Institut International de Recherche sur les cultures des zones tropicales semi-aride
IFEN :	L'Institut Français de l'Environnement.
IITA :	Institut International d'Agriculture Tropical
INEAC :	Institut National pour l'Etude Agronomique du Congo-Belge
INERA :	Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques
INERA/Mvuazi :	Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques/Centre de Recherche de Mvuazi
ITAB :	Institut Technique de l'Agriculture Biologique
LAI :	Indice de surface foliaire
LC:	Labour de Conservation
N <sub>2</sub> :	Diazote
NS :	Non significatif
PAR :	Photosynthetically Active Radiation
PNE:	Programme National Engrais.
QPM :	Maïs à Qualité Protéique
RDC:	République Démocratique du Congo
REAFOR :	Projet de Relance de la Recherche en Agriculture et Foresterie
SCV :	Semis Direct Sous Couvert Végétal.
SD:	Semis Direct.
SSSA :	Société Américaine de Science du Sol
STICS:	Simulateur multidisciplinaire pour les cultures standards
SUCROS :	Simple and Universal Crop Simulator
TCS:	Techniques Culturelles Simplifiées
USA	Etats Unis d'Amérique

## Liste de tableaux

Tableau 2.1 : Caractéristiques des variétés de maïs et de légumineuses (niébé et soja).....	55
Tableau 2.2 : Paramètres physique et chimique sélectionnés pour les analyses de sol du site d'expérimentation INERA/Mvuazi. ....	59
Tableau 2.3 : Effets des associations et des monocultures sur les différentes variétés de maïs pour les nombre de plants, biomasse des épis vendables, biomasse des épis non vendables et rendement en grains à la première saison. ....	60
Tableau 2.4.: Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants par parcelle, de la biomasse des graines, de la biomasse des gousses vides et du rendement en graines des légumineuses à la première saison. ....	62
Tableau 2.5: Effets des types de paillis et des monocultures sur les différentes variétés de maïs pour les paramètres de nombre de plants, biomasse des épis vendables, biomasse des épis non vendables et rendement en grains à la deuxième saison. ....	63
Tableau 2.6: Effets des traitements d'associations des cultures et de rotation sur le rendement en grains des variétés de maïs en première et en deuxième saisons .....	65
Tableau 2.7 : Analyse économique des variétés de maïs en système d'association avec les légumineuses ....	66
Tableau 2.8 : Analyse économique des variétés de maïs sur paillis de légumineuses .....	67
Tableau 3.1. Rendement en grain en monoculture et en culture mixte du maïs et des légumineuses.....	79
Tableau 3.2. Indices de compatibilité des cultures en association.....	80
Tableau 3.3. Indices des avantages monétaires des cultures en association.....	84
Tableau 4.1. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du maïs en monoculture et en association pour la hauteur des plants. ....	95
Tableau 4.2. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du maïs en monoculture et en association pour le diamètre au collet.....	96
Tableau 4.3. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du soja en monoculture et en association pour la hauteur des plants. ....	98
Tableau 4.4. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du soja en monoculture et en association pour le diamètre au collet.....	99
Tableau 4.5. : Estimation des paramètres du modèle pour les deux arrangements de maïs dans les traitements d'association et de monoculture. ....	101
Tableau 4.6. : Estimation des paramètres du modèle pour les deux arrangements de soja dans les traitements d'association et de monoculture. ....	103

## Liste de figures

Figure 1.1. Trois piliers des systèmes SCV (Séguy et al., 2009).....	23
Figure 1.2. : Culture de maïs en système pluvial A) sans protection avec des poches de sécheresse B) avec protection du paillis de la culture précédente (Amadji et al., 2007). .....	24
Figure 1.3. : Schéma conceptuel permettant l'étude : a) des compétitions intraspécifiques (rang), b) des compétitions interspécifiques (rang) et c) de l'équilibre entre compétitions intra- et interspécifiques (comparaison sur le rang ou la surface) (Cruz et Soussana, 1997).....	25
Figure 1.4. : Principe des interactions entre espèces .....	26
Figure 1.5. : Fortes carences sur le maïs en compétition avec les adventices non maîtrisées (Husson et al., 2009) .....	28
Figure 1.6. Culture associée céréale légumineuses (INERA, 2013) .....	32
Figure 1.7. Allure générale de la courbe de croissance des plantes (Hassani, 1994).....	38
Figure 1.8.a : Stades de croissance du maïs (McWilliams et al., 1999). .....	39
Figure 1.8.b : Stades de croissance du soja (McWilliams et al., 1999). .....	39
Figure 1.9. : L'évolution de la surface foliaire d'une plante en fonction du temps thermique (Li, 2013). .....	42
Figure 1.10. Carte des zones Agroécologiques de la République Démocratique du Congo (REAFOR, 2008) ....	45
Figure 1.11. : Carte de la RD Congo et du Kongo Central, Centre de Recherche INERA/Mvuazi (Tshiabukole, 2018). .....	46
Figure 1.12. Carte du Centre de Recherche de Mvuazi (Zone d'étude) (Source : Valentin et al, 2009) .....	47
Figure 1.13. Précipitations mensuelles et température moyenne de l'air pendant la période des expérimentations (campagne 2011-2012 et saison B 2018).....	48
Figure 1.14. : Carte pédologique de la contrée de Mvuazi (Kongo Central) (Source : Denisoff et Devred, 1954) .....	50
Figure 1.15 : Végétation du Centre de Recherche de Mvuazi et ses environs (Source: Denisoff et Devred, 1954 ; PRAGMA, 1987).....	52
Figure 2.1. : a) Semis des parcelles de légumineuses en intercalaire avec le maïs ; b) parcelle de culture intercalaire maïs-soja ; c) parcelle de culture intercalaire maïs-niébé ; d) Semis des parcelles de maïs et légumineuses en monoculture ; e) parcelle de monoculture de maïs ; f) parcelle de monoculture de légumineuse (niébé).....	56
Figure 2.2. : a) Semis de maïs sur paillis des légumineuses ; b) maïs sur paillis de niébé ; c) maïs sur paillis de soja ; d) semis de maïs sur paillis de maïs ; e) parcelle de monoculture de maïs sur paillis de maïs ; f) croissance des variétés de maïs semés sur paillis de maïs (à gauche) et sur paillis de niébé (à droite). .....	57
Figure 2.3. : Parcelles des variétés de maïs semés a) sur paillis de maïs ; b) sur paillis de maïs+niébé et c) sur paillis de maïs+soja. ....	64
Figure 3.1. : Parcelles de a) maïs semés en monoculture ; b) maïs en association avec le soja ; c) monoculture de soja ; d) monoculture de niébé.....	73
Figure 3.2: Screen plot montrant les variations cumulatives et valeur propres des facteurs .....	85
Figure 3.3 : a) Projection plane des variables générées par l'ACP des paramètres étudiés ; b) Distribution des variétés générée par les axes Dim 1 et Dim 2 selon l'ACP des paramètres étudiés. ....	85
Figure 4.1. : a) monoculture de maïs avec arrangement (1,00 x 0,25) m en intercalaire ; b) maïs-soja en association intercalaire ; c) monoculture de soja avec arrangement (0,40 x 0,20) m en intercalaire ; d) monoculture de maïs avec arrangement (0,50 x 0,50) m en bande ; e) maïs-soja en bande d'association ; f) monoculture de soja avec arrangement (0,30 x 0,15) m en bande. ....	89
Figure 4.2. : Précipitations et températures moyennes journalières durant la période expérimentale d'avril à août 2018. ....	90



Figure 4.3. Evolution de la hauteur des plants de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association .....	95
Figure 4.4. : Evolution du diamètre au collet de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association .....	97
Figure 4.5. : Evolution de la hauteur des plants de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association .....	98
Figure 4.6. : Evolution du diamètre au collet de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association .....	100
Figure 4.7. Simulation de l'indice foliaire de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association au temps thermique des conditions saisonnière.....	102
Figure 4.8. Simulation de l'indice foliaire de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association au temps thermique des conditions saisonnières. ....	103

## 0. Introduction

### 0.1. Concepts

L'agriculture de conservation présente plusieurs avantages notamment d'ordre agronomique, environnementale et socio-économique. A ce titre, elle est une alternative intéressante pour relever les multiples défis auquel doit faire face le secteur agricole aujourd'hui ; à savoir (1) nourrir la population mondiale et éradiquer la faim dans un contexte malthusien de la croissance de la population, (2) préserver l'environnement, (3) développer une résilience face aux perturbations climatiques (FAO, 2005). L'agriculture de conservation contribue, par ses trois principes techniques (le travail du sol minimal, la technique d'association des cultures et le système de couverture du sol) à l'augmentation de la productivité agricole par unité du capital respectivement, humain (main d'œuvre), physique (foncier) et financier (Griffon, 2006 ; FAO, 2011).

La productivité par unité de main d'œuvre a été atteinte en Europe après la seconde guerre mondiale et plus tard vers les années 70, dans tous les systèmes de culture qui utilisent massivement les intrants, spécifiquement en Amérique latine et en Asie des moussons» (Griffon, 2006). Elle est l'œuvre d'une révolution des pratiques culturales agronomiques et d'une intensification de la conduite des systèmes de culture qui ont eu malheureusement un impact négatif sur l'environnement (Boiffin *et al.*, 2001, Tilman *et al.*, 2002, Millenium Ecosystems Assessment, 2005), on cite : la sélection variétale a occasionné la perte de la diversité intra spécifique. L'usage massif des fertilisants a dégradé la qualité des sols à savoir, il a baissé la teneur en matière organique, et a altéré les propriétés physico-chimiques et donc il a entraîné une baisse de fertilité des sols et les déclenchements de processus érosifs. L'agriculture industrielle spécialisée, faite essentiellement de monocultures, a déséquilibré les écosystèmes. L'irrigation a occasionné la substitution des écosystèmes. La mécanisation a entraîné la diminution de la diversité interspécifique (Brundtland, 1987, Mignolet, 2003). La lutte chimique a entraîné la réduction des espèces (Glibert *et al.*, 2006 ; IFEN, 2007) et la pollution importante des eaux souterraines et de surface (Kizungu, 2001).

L'augmentation de la productivité par unité de surface peut constituer une raison importante pour cultiver deux ou plusieurs cultures ensemble ou en des périodes successives échelonnées (Hamd-Alla *et al.*, 2014). Dans les pays du Sud, la gestion des terres est un problème complexe pour l'agriculture et pose des problèmes spécifiques d'environnement (érosion, effet de serre,

séquestration du carbone, protection de la biodiversité, etc.). Le sol y a une place majeure et représente un capital pour la production agricole, mais aussi pour la défense de l'environnement, capital qu'il faut conserver, voir améliorer (FFEM, 2008).

En Afrique, les agriculteurs disposent des connaissances empiriques raffinées de gestion des terres qui les rendent résilients aux chocs socio-économiques (Mutsaers *et al.*, 1981a, b). En revanche certaines pratiques traditionnelles entre autres, les déboisements incontrôlés, les défrichements des terres des pentes sans tenir compte des courbes de niveaux, les brûlis, l'écobuage et la préparation manuelle des terres sont agro-écologiquement acceptables mais, ne sont convenables que pour la subsistance. Elles offrent peu ou presque pas d'options pour intensifier la production (Hauser *et al.*, 2006, Nolte *et al.*, 2005) mais aussi apparaissent comme les principaux facteurs déclencheurs de l'érosion des sols et menacent leur utilisation durable (Sadio, 2008). Et pourtant, la tendance actuelle est d'aller vers la performance de l'agriculture conventionnelle soit par l'augmentation de la surface emblavée, soit par l'augmentation de la productivité des systèmes de cultures, ce qui est difficile dans le contexte de la forte croissance démographique d'environ 3% (Brundtland, 1987).

Sur ces bases, diverses alternatives de gestion des terres sont testées dans les régions intertropicales. Elles participent dans ce qui est généralement dénommé l'« Agroécologie ». Elles sont toutes basées sur la nécessité : (i) de restituer au sol des quantités élevées de matières organiques (d'origine variée), (ii) de couvrir le sol le plus possible pour lutter contre l'érosion, (iii) de favoriser le stockage de matière organique dans le sol car celle-ci exerce un rôle capital aussi bien du côté de la fertilité que du côté environnemental (c'est elle qui est le compartiment de séquestration du carbone), (iv) de ne pas travailler le sol. Parmi ces alternatives on peut citer : les plantations sylvicoles, l'agroforesterie, le non brûlis des terres que ce soit des jachères, des résidus de récolte ou de certaines cultures comme la canne à sucre et, plus récemment (au Brésil d'abord puis à Madagascar, au Laos et divers pays africains), les « systèmes de cultures en semis direct, sans travail du sol sous couverture végétale » communément désignés SCV (FFEM, 2008), dont il a été question dans nos travaux de recherches pour la thèse.

Le « semis direct sous couverture végétale permanente » (SCV) est une nouvelle approche de l'agriculture qui s'inspire de l'écosystème forestier pour privilégier la production alimentaire, la gestion des ressources (stockage de l'eau, fertilité des sols), la lutte contre la désertification (réduction de l'érosion) et l'accroissement du bien-être sur le plan économique du fait de la réduction des temps de travaux (désherbage, travail du sol) et de leur pénibilité. Ce qui entraîne la réduction de la consommation en carburant pour les grandes exploitations, des intrants

(engrais, pesticides) et des investissements (tracteurs et accessoires). En conséquence, ces systèmes procurent une meilleure rentabilité de la terre, du capital et du travail (Giraud et Loyer, 2008).

Le système de semis direct sous couvert végétal mort ou vif (SCV) assure une bonne productivité des surfaces cultivées et donne beaucoup d'avantages dans la gestion du sol (Capillon et Séguy, 2002 ; CIALCA, 2008). Cela peut être vu comme la mise en application des pratiques de diversification, de concurrence et de facilitation des espèces dans les systèmes de culture d'association (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2006). Dans ce système de culture, un système de rotation de cultures avec une intégration des plantes de couverture a aussi été proposé en plus de l'association de cultures, afin de résoudre les problèmes d'épuisement de terre de culture (Ilnicki et Enache, 1992 ; Machet *et al.*, 1997). Pour être performants, ces systèmes de cultures doivent produire une forte biomasse, en particulier les premières années d'entrée en semis direct.

Pour compléter la série de méthodes d'évaluation du SCV, un certain nombre d'indices pour évaluer la compatibilité des différents types d'associations céréales-légumineuses a été proposé par Banik *et al.*, (2000) ; Ghosh, (2004) ; Agegnehu *et al.*, (2006) ; Banik *et al.*, (2006) ; Dhima *et al.*, (2007). Ces indices qui sont des dérivations mathématiques peuvent aider les chercheurs à récapituler, interpréter, et présenter les résultats des essais de compétitivité entre différentes cultures (Weigelt et Jolliffe, 2003).

Les rapports des approches mathématiques ou modèles simulant la plantation pour la culture d'association céréale-légumineuse montrent que la compétition qui existe dans la culture mixte pourrait être l'aspect principal affectant le rendement par rapport à l'implantation des cultures pures des céréales (Yilmaz *et al.*, 2008).

L'agriculture de conservation semble être prometteuse parmi des solutions proposées aux agriculteurs africains pour stabiliser ou améliorer la productivité de leurs exploitations et d'y demeurer durablement.

## **0.2. Problématique**

En République Démocratique du Congo (RDC, en sigle), la saturation des terres et la stagnation ou la baisse des rendements des cultures dans les différentes zones agro-écologiques conduisent à une mise en culture de plus en plus fréquente et de plus en plus importante. En effet, l'intensification des cultures existantes exige une augmentation en intrants, pouvant entraîner la diminution des activités biologiques du sol en l'occurrence des vers de terre, l'acidification et la dégradation de la structure des sols due aux érosions et ruissellements. Les résultats des recherches de plus de 30 ans (Beirnaert, 1941 ; Harroy, 1944, et Jurion et Henry, 1967) montrent les causes et les facteurs de la dégradation physique et chimique des terres ; les conclusions suggèrent un certain nombre de méthodes capables de retarder localement cette dégradation, de limiter les pertes, voire de restaurer un potentiel de fertilité acceptable pour une agriculture durable. Cependant et Selon Sadio (2008), l'agriculture en RDC est réalisée avec un faible apport de restitutions des éléments minéraux exportés par les productions comestibles. Elle occasionne beaucoup de pertes dues aux conditions écologiques, mais surtout à la gestion des ressources naturelles par l'homme. Ce mode de gestion consiste principalement en des méthodes culturales inadéquates.

Par ailleurs, 79 % des sols de la RDC en général, et du sud-ouest en particulier, appartiennent au groupe des ferralsols, caractérisé par une faible teneur en matière organique et une faible capacité de rétention en eau, résultant d'une faible disponibilité d'azote et phosphore (Aloni et Mergeai, 2010). Ces sols pauvres et fragiles constituent généralement la majeure partie de terre des petits fermiers congolais qui disposent de peu de moyens pour y travailler. D'après Aloni et Mergeai (2010), ces fermiers ne pratiquent pas l'agriculture mécanisée et emploient peu ou pas du tout les fertilisants et par conséquent, leurs rendements sont donc très faibles et la gestion de la fertilité des sols reste basée sur les pratiques rudimentaires et précaires comme de la jachère et incinération.

Pour résoudre un bon nombre de problèmes causés par ces pratiques au cours de ces dernières années en RDC, les essais agronomiques ont été orientés vers les effets directs et résiduels des fertilisants sur les cultures, la fixation symbiotique de l'azote chez les légumineuses, les amendements directs et les interactions plante-engrais minéraux en fonction de période de semis, période d'application d'engrais et de l'épaisseur de l'horizon humique (FAO et PNE, 1998). Cependant le coût élevé et la rareté des engrais rendent improbable la possibilité

d'augmenter à grande échelle l'emploi de ces derniers, pour l'amélioration du rendement (Aloni et Mergeai, 2010).

### ***0.3. Cadre de références théoriques***

L'agriculture de conservation se réfère à plusieurs pratiques qui permettent la gestion du sol pour des utilisations agraires altérant au minimum sa composition, sa structure et sa biodiversité naturelle et le préservant de l'érosion et de la dégradation. Cela implique le semis direct (SD), les techniques culturales simplifiées (TCS) ou labour de conservation (LC), la non-incorporation des résidus de récolte et les couverts végétaux (paillis ou mulch) ou engrais verts (CDSR, 2001). En systèmes de labour de conservation, la perturbation ou la manipulation du sol doit respecter la présence d'un mulch d'au moins 30% de sol couvert et l'élimination de toute action de retournement ou mixage des horizons (Sandretto, 2001).

Il est démontré (Carof, 2006) que le fonctionnement d'un agrosystème peut être amélioré dans toutes ses composantes biologique, chimique et physique lorsque son sol n'est plus travaillé et qu'il est couvert en permanence par plusieurs espèces végétales vivantes. En effet, les cultures associées interagissent par l'intermédiaire de l'environnement (sol, climat, organismes vivants). Les légumineuses disponibilisent l'azote dans le sol et les autres cultures comme les céréales prélèvent cet azote ; elles ont donc une action sur l'environnement et l'environnement modifie la réponse des cultures associées.

Les associations permanentes des cultures sur les sols non travaillés (AFD, 2006) ont une implication sur la composante biologique à savoir : (1) sur les agents structurants (augmentation de la biomasse des microorganismes, des racines et des vers de terre), (2) sur les ennemis des cultures en favorisant certains bioagresseurs, modification de la composition de la flore adventice, lutte contre les adventices par allélopathie (ensemble de plusieurs interactions biochimiques directes ou indirectes, positive ou négatives, réalisées par les plantes entre elles, ou avec des microorganismes (Gfeller et Wirth, 2017)). Elles ont aussi une implication sur la composante chimique à savoir (i) sur la lumière (effet d'ombrage sur les adventices et la culture basse, (ii) sur les éléments minéraux (enrichissement en surface, prélèvement ou disponibilisation des nutriments). Elles ont également une implication sur la composante physique à savoir (a) sur les propriétés hydriques (meilleure rétention d'eau, prélèvement ou disponibilisation d'eau, modification de la vitesse d'infiltration de l'eau, modification du

mouvement des solutés), (b) sur la structure (stabilisation des agrégats, augmentation de la microporosité structurale en surface) (AFD, 2006).

#### **0.4. Questions de recherche**

Les textes antérieurs nous montrent les impacts, favorables ou défavorables, de la technique du semis direct sur les composantes biologiques, chimiques et physiques du milieu cultivé. Tandis que l'association culturale de deux espèces (de vente et/ou de couvertures) conduites conjointement, établit des interactions qui sont des phénomènes complexes et dynamiques, faisant intervenir des mécanismes de compétition et de facilitation pour les ressources du milieu (Carof, 2006). L'augmentation de la diversité des composantes biologique s'accompagne d'un accroissement de la productivité par unité surface et les rotations de cultures permettent une augmentation de la productivité par unité de temps (Ferguson 2015, Morel, 2016). Ces informations sont, le plus souvent, disponibles pour des espèces associées, à valeur marchande, implantées sur un sol travaillé.

De ce fait, les questions suivantes peuvent être posées :

- quelles interactions s'établissent entre des espèces associées qui sont cultivées sur un sol non travaillé et qui présentent des fonctions différentes au sein de l'agro-écosystème (*ex.* une espèce à fonction commerciale et une espèce à fonction agro-écologique) ?
- Quelle pratique mettre en place pour augmenter la productivité agricole dans un contexte d'un climat à forte fluctuation pluviométrique, sur des terres pauvres, dans un contexte socio-économique aux possibilités d'investissement limitées et faible niveau de formation des intervenants et évoluant dans un environnement de production peu ou pas protégé. Les poches de sécheresse pendant la saison des pluies et le décapage du sol par des ruissellements des pluies fréquentes et très rapprochées peuvent-elles être surmontées par le système SCV ?
- Quelle est l'importance des interactions entre les composantes du milieu cultivé : comment le couplage de la technique du semis direct à celle de l'association culturale change-t-il la dépendance des composantes du milieu les unes par rapport aux autres ?
- Ce système est-il économiquement viable ? Est-il écologiquement durable ?

Il y a autant de questions sans réponse au jour d'aujourd'hui.

## **0.5. Hypothèses**

### **0.5.1. Hypothèse globale**

Dans cette thèse, nous pensons que la mise en place d'une agriculture de conservation (AC) sur base des principes de gestion des agro-écosystèmes à savoir (1) la perturbation minimale du sol, (2) la protection du sol via le maintien d'une couverture végétale permanente en surface, (3) la diversification des rotations et des associations de cultures (FAO, 2017), apporterait des voies et itinéraires dans la recherche des solutions pour une productivité durable, économiquement rentables et facilement applicables, tout en préservant l'environnement, est un enjeu capital pour notre Pays.

Dans certains cas, le semis se fait à travers le couvert sans aucun travail du sol (SCV : semis direct sous couvert végétal mort ou vivant). L'AC ne se réduit donc pas au simple changement dans les techniques de travail du sol, mais elle associe d'autres innovations telles que l'usage de plantes de couverture ou de culture associées.

Etant donné que le semis direct participe aussi à l'amélioration de certaines caractéristiques de la qualité du sol, à savoir « *sa capacité à fonctionner dans un écosystème particulier pour produire de la biomasse, tout en maintenant la qualité de l'air et de l'eau et assurant la santé des plantes et des animaux* » (SSSA, 2006). Cette définition souligne l'importance de la qualité du sol qui conditionne la production agricole (Rezaei *et al.*, 2005), mais également d'autres fonctions comme l'habitat des espèces telluriques ou le transfert de l'eau et des solutés.

### **0.5.2. Hypothèses spécifiques**

A partir de notre proposition du fonctionnement d'un agrosystème fournissant les informations nécessaires à la bonne production de céréales et de légumineuses en milieu paysan et dans le cadre thématique que nous venons de préciser, nous tenterons dans ce travail, de vérifier les hypothèses suivantes :

- ✓ Une culture commerciale et une plante de couverture commerciale établiraient des relations qui ont un impact sur le rendement des deux cultures. L'intensité de ces relations varierait d'une culture associée à l'autre, selon l'espèce de légumineuse cultivée en couverture.



- ✓ Les relations de compétition et/ou de facilitation entre les espèces de plantes de couverture commerciales associées à la culture commerciale dans un SCV affecteraient les indices de compétition.
- ✓ Dans les SCV avec cultures associées, l'estimation des paramètres de simulation du modèle de Baret pour différents arrangements spatiaux pourrait prédire la croissance et le rendement des espèces cultivées en association.

## **0.6. Objectifs du travail**

### **0.6.1. Objectif général**

Le présent travail a pour objectif général de contribuer à l'augmentation de la production du maïs et des légumineuses vivrières, par la mise en place d'un système cultural intégré appelé SCV avec cultures associées en savane du sud-ouest de la RDC. Ce système assurera une certaine pérennité dans la gestion des terres des fermiers, que ce soit pour une agriculture de subsistance ou pour les cultures intensives à travail minimum, ainsi qu'à la lutte contre une des causes majeures du réchauffement global, grâce à la fixation dans le sol d'importantes quantités de carbone.

### **0.6.2. Objectifs spécifiques**

Nous allons focaliser notre étude sur:

- La production et la restitution au sol d'une forte biomasse par associations/successions d'une diversité de plantes aux fonctions multiples afin d'améliorer la rentabilité de la culture de maïs ;
- L'évaluation de la compétition et/ou la facilitation à la lumière et aux éléments nutritifs des différentes variétés de maïs et des deux espèces de légumineuses mis en monoculture et en SCV, ainsi que la détermination de leurs avantages dans le système de culture et un revenu socio-économique plus élevé par l'examen des indices de compétitivité et d'avantage économique du maïs et des légumineuses ;
- Le développement et l'évaluation des approches logistiques et exponentielles simulant le développement et l'indice de surface foliaire du maïs et du soja sous l'effet de différents arrangements spatiaux (systèmes en intercalaire et en bande) en culture d'association.

## **0.7. Intérêt et Justification de l'étude**

Les raisons scientifiques du choix de cette étude sont dictées, d'une part : par l'étude bibliographique. Dans la littérature internationale, cette information est le plus souvent disponible pour des espèces à valeur marchande, associées et implantées sur un sol travaillé. D'autre part, les SCV avec cultures associées ou en rotation sur un sol non travaillé ne seront acceptés que si le rendement des cultures de vente est maintenu à un niveau économiquement rentable pour le monde agricole : par conséquent, il s'agit de comprendre les relations de compétition entre les espèces qui sont considérées dans ces systèmes de culture particuliers afin d'apprécier leurs impacts sur la production et le cas échéant, les gérer.

Selon une étude menée en RDC par Vancutsem *et al.* (2006), l'érosion hydrique, entraînée par les déboisements et les pratiques culturales, serait responsable chaque année de près de 160 à 220 tonnes de terres (0,75 à 4 cm d'épaisseur) décapées et transportées par les eaux de ruissellement vers les cours d'eau. Ces données attestent de l'importance de maintenir un couvert végétal adéquat à la surface du sol pour minimiser les risques d'érosion et les pertes en terres. Même si pour l'instant dans la majeure partie des zones, la densité du couvert forestier permet de freiner l'érosion et de minimiser les pertes en terres, on peut craindre que la pression foncière et l'accélération du rythme des déboisements à des fins agricoles conduisent à une érosion très agressive, avec des conséquences désastreuses et irréversibles sur les sols (Sadio, 2008).

## **0.8. Méthodologie et outils de collecte de données**

Pour vérifier les hypothèses fixées dans ce travail, la première difficulté était de créer l'objet de recherche. Pour cette raison, un dispositif expérimental a été mis en place au Centre de recherche INERA/MVUAZI au Kongo Central (RD Congo) pendant trois campagnes d'étude. Il s'appuie sur la culture de maïs cultivé en sémi direct sur deux types de couvert végétal de légumineuses (le soja et le niébé) utilisées comme plante de couverture vivante (en association) ou morte appelé paillis (en rotation). Ces espèces ont été choisies pour leurs différences morphologiques et physiologiques qui ont permis d'explorer *à priori* (i) une large gamme de relations de compétition et de facilitation pour les ressources du milieu et, (ii) une large gamme d'effets du système sur la croissance des espèces, sur l'élaboration de leur rendement et sur leur

productivité. De plus, les SCV avec cultures associées ont été comparés à un SCV sans cultures associées pour distinguer les effets des espèces de couverture de ceux du non travail du sol sur différentes variables prises en compte pendant la recherche.

### ***0.9. Structure de la thèse (Organisation et subdivision de la thèse)***

Le présent travail se subdivise en sept parties : une introduction générale et six chapitres. Le premier chapitre traite de la synthèse bibliographique et analyse des données disponibles sur le système de culture sous-couvert végétal, le modèle et simulation des cultures associées, ainsi que du milieu d'étude. Le deuxième chapitre est consacré à l'évaluation de l'association et de la rotation du maïs avec légumineuses vivrières, en semis direct dans le sud-ouest de la RDC. Dans le troisième chapitre, il est exposé l'évaluation du rendement et des indices de compétitivités pour les cultures d'association de variétés de maïs, du soja et du niébé dans la zone de savane du sud-ouest de la RDC. La simulation des effets des différents arrangements spatiaux sur la dynamique foliaire du maïs et de soja mis en association fait l'objet du quatrième chapitre. Dans le cinquième chapitre, est présentée la discussion générale. Enfin, dans le sixième chapitre, sont présentés la conclusion générale ainsi que quelques perspectives.

# **Chapitre 1 : Synthèse bibliographique et analyse des données disponibles sur le système de culture sous-couvert végétal, modèle et simulation des cultures associées et le milieu d'étude**

## ***1.1. Le Système de Culture Sous-couvert Végétal (ou SCV)***

### **1.1.1. Introduction**

L'agriculture de conservation est apparue comme une alternative à l'agriculture conventionnelle pour assurer une régularité aux rendements et protéger les ressources sol (contre l'érosion) et eau (contre l'évaporation), dans des zones bioclimatiques où la pluviométrie est rare et irrégulière (Ben-Salem *et al*, 2006). Dans les cultures extensives, la gestion du sol, l'irrigation et la fertilisation représentent les coûts majeurs de production. Avec le système traditionnel de culture, ces coûts augmentent de façon importante. Grâce à l'agriculture de conservation, nous parvenons à réduire ces coûts, et de plus nous améliorons le sol (Escribano, 2006). Cependant, l'adoption de ces techniques a des conséquences sur le choix des rotations, l'utilisation de cultures intermédiaires, la gestion des résidus, la sélection des variétés et la densité de semis, le contrôle des ravageurs et des adventices, la gestion de la fertilité du sol et sur le choix du bon équipement (Labreuche *et al.*, 2007). Dans le cadre de l'agriculture de conservation, le « non labour », « agriculture sans labour » et « zéro – labour » sont des synonymes du semis direct qui est un nouveau mode d'exploitation des ressources naturelles sol et eau, elle a été mondialement diffusée au nom du développement durable (Séguy *et al*, 2001 ; Lahmar *et al.*, 2006 ; FAO, 2007 ; Serpantié, 2009). Le terme générique de semis direct sous couvert végétal permanent recouvre plusieurs réalités : semis sans labour, c'est-à-dire dans les résidus de la culture précédente, semis dans un paillis (ou mulch) plus ou moins épais formé grâce à une plante de couverture cultivée à cet effet, semis dans un couvert végétal vivace en système d'association de culture, semis dans un paillage rapporté, etc. Suivant les systèmes pratiqués, les conséquences sur la fertilité, sur la production et sur le calendrier cultural ne sont pas les mêmes ; le choix d'un système plutôt qu'un autre dépend d'une situation écologique et sociale donnée et, du point de vue de l'exploitation, la construction des assolements, des rotations et des associations végétales est différente (Raunet *et al*, 1998).

### 1.1.2. Historique du SCV

Le principe du semis direct sur couverture végétale est loin d'être nouveau. Déjà, le semis direct existe depuis le début de l'histoire de l'agriculture et reste la base des systèmes agricoles sous les tropiques. Les associations de cultures sont aussi des pratiques très répandues. Concernant spécifiquement le semis direct sur couverture végétale, il existe aussi des modalités ancestrales, développées pour l'essentiel en zone tropicale humide, dont certaines ont perduré avec ou non des adaptations (Dounias et Jouve, 2001). Les idées de base et la mise en pratique du semis direct ont émergé en dehors des zones tropicales, d'abord aux USA à partir des années 60, puis au sud du Brésil (sub-tropical), en Australie, en Argentine et au Canada à partir des années 70 (AFD, 2006).

En région tropicale, les pratiques agricoles ne sauraient être calquées sans risque de l'agriculture intensive des régions tempérées, car les contextes naturels et humains sont totalement différents. Sur le plan des contraintes techniques, l'érosion, l'instabilité climatique et l'emprise des mauvaises herbes constituent les écueils majeurs à une agriculture rentable et durable (Raunet *et al.*, 1998).

Les pratiques agricoles, jusqu'alors constituées par le labour, les pulvérisations répétées des cultures et la pratique excessive de la monoculture, ont entraîné des catastrophes écologiques de grande ampleur aux lourdes conséquences socio-économiques. Le cas le plus connu est celui du *dust bowl* (nuages de poussière recouvrant infrastructures, champs,...) entre les années 20 et 40. Ce véritable fléau national fut à l'origine de la remise en cause du labour dès les années 30 aux USA. Des phénomènes comparables ont eu lieu en Australie durant les années 50-60. En Amérique latine, le semis direct a commencé à être adopté par quelques agriculteurs à partir des années 70 suite à des phénomènes importants d'érosion hydrique dans le sud du Brésil (État du Parana) et en Argentine dans les Pampas Centrales. Au cours des deux dernières décades, la mise en place d'itinéraires culturaux favorisant la durabilité des systèmes de culture a été observée. Ces questions, notamment celles liées à la dégradation des sols, ont été abordés par Heal *et al.* (1997). Cette prise de conscience, individuelle ou collective, des processus d'érosion des terres, a été le point de départ du semis direct dans ces différentes régions du monde (AFD, 2006).

Depuis, le semis direct sur couverture végétale sous ses formes modernes se diffusent en zone tropicale, soit de façon spontanée, soit sous l'égide de la recherche-développement, avec des succès très variables selon les contextes (Dounias et Jouve, 2001). De ces jours, les SCV sont

mis en place sur des millions d'hectares au Brésil en culture motorisée, cependant ils sont en cours d'adaptation en Afrique et dans les îles de l'océan Indien. La création de ces systèmes est indissociable de méthodes qui impliquent des agronomes généralistes et les professionnels agricoles. Ils constituent aussi des espaces privilégiés pour les recherches thématiques car les processus mis en jeu sont complexes (Raunet *et al.*, 1998).

Les systèmes de culture sur couverture végétale (SCV) ont été adoptés à grande échelle dans des régions éloignées de celles de l'Afrique centrale en général et du Nord-Cameroun en particulier en ce qui concerne notamment les conditions climatiques, économiques et sociales de la production agricole (cas du Brésil) (Séguy *et al.*, 1998). A Madagascar, d'importants efforts sont déployés pour la diffusion des SCV en milieu paysan (Rollin, 1997 ; Balarabé, 2004). En zone cotonnière d'Afrique soudano sahélienne en général, et au Nord-Cameroun en particulier, de nombreuses études, faites depuis l'année 2000 sur les SCV (M'Biandoun et Guibert, 2004 ; M'Biandoun *et al.*, 2005, 2006 ; Dongmo *et al.*, 2006) , montrent que ces systèmes sont techniquement adaptés pour développer une agriculture innovante et durable : amélioration du taux de matière organique du sol (MOS), meilleure gestion de l'enherbement et de l'eau du sol et réduction de l'érosion sans compromettre la production de graines alimentaires. Mais, au-delà de cet intérêt technique et malgré l'engouement manifesté par les paysans qui ont participé à ces expérimentations démonstrations, les SCV tardent à s'implanter dans les terroirs et les unités de production (UP) (M'Biandoun *et al.*, 2009).

### **1.1.3. Principes fondamentaux des écosystèmes cultivés en SCV**

Les principes fondamentaux du semis direct sur couverture végétale permanente sont ceux de conduite des écosystèmes cultivés en SCV visant à reproduire le fonctionnement d'un écosystème naturel forestier et en particulier celui de sa litière. Ils visent :

- A. La minimisation des perturbations du sol et de la litière.** Des études ont déterminé les effets des labours sur les caractéristiques physiques des sols. Cambardella et Elliot (1993) montrent que dans les sols labourés, une dégradation de la structure des agrégats peut se produire, associée à une perte de carbone (C) et d'azote (N) par minéralisation. Ehlers (1975), Baumhardt *et al.* (1993), Liebig *et al.* (1993), Azooz *et al.* (1996) et Scopel *et al.* (1999) ont mis en évidence que l'infiltration de l'eau augmente avec un

travail intensif du sol, mais que si celui-ci reste découvert, un tassement peut se produire au niveau de la surface provoquant une diminution importante de la conductivité hydraulique et un accroissement du ruissellement.

La faible perturbation du sol est favorable au développement de l'activité biologique, ralentit la minéralisation et permet de maintenir la couverture végétale. En effet, selon la commission « agronomie-système de production » de l'ITAB (2002), il n'y a pas de différence fondamentale de fonctionnement des activités biologiques entre agriculture biologique et agriculture conventionnelle. De plus, c'est souvent en période de conversion à l'agriculture biologique qu'apparaissent des questions sur les activités biologiques des sols. L'un des principaux facteurs limitant la production en agriculture biologique étant l'azote (Séguy *et al.*, 2009), nous abordons les activités biologiques des sols sous l'angle de la fertilité. En effet les fournitures d'azote, et par d'autres mécanismes, du phosphore, dans les systèmes agrobiologiques, sont beaucoup plus liées aux activités biologiques que dans les systèmes avec apports d'engrais minéraux solubles. De même, une attention particulière est portée au statut organique des sols, avec une présentation des approches analytiques permettant de mieux l'appréhender.

**B. La couverture permanente et totale du sol.** Le sol est maintenu en permanence protégé sous une épaisse couverture végétale qui peut être morte (les résidus de récolte, les adventices et/ou les plantes de couverture sont totalement contrôlés avant la mise en place de la culture) ou maintenue vivante (une couverture végétale pérenne est simplement contrôlée pendant le temps de croissance de la culture principale, sans être tuée, ce qui lui permet de poursuivre sa croissance après la récolte de cette culture). Certains auteurs mettent en évidence la protection du sol par différents paillis contre l'effet des pluies agressives, la formation de croûtes superficielles en surface du sol et, en conséquence, l'érosion hydrique (Casenave et Valentin, 1989 ; Edwards *et al.*, 1993 ; Morin et Van Winkel, 1996 ; Findeling, 2001). La combinaison des effets du paillis sur la libération de nutriments et la disponibilité en eau du sol a été étudiée par plusieurs auteurs (Tian, 1998 ; Mitchell *et al.*, 1999 ; Tan *et al.*, 2002). Cette couverture végétale protège le sol en permanence contre l'érosion, entretient des conditions favorables au développement d'une activité biologique intense et contribue à réduire la pression des adventices.

**C. La production et restitution au sol d'une forte biomasse.** Cette biomasse est renouvelée annuellement (ce qui permet de maintenir la couverture du sol malgré la minéralisation) par diverses plantes (cultures et plantes couverture) multifonctionnelles, conduites en association et/ou en succession et qui remplissent des fonctions écosystémiques diverses (Séguy *et al.*, 2009).

L'écosystème cultivé en SCV est cependant intensifié par rapport à un écosystème naturel, pour permettre la production de cultures et/ou de fourrages qui sont exportés (ce qui implique en retour des apports pour restituer les éléments nutritifs prélevés par le système).

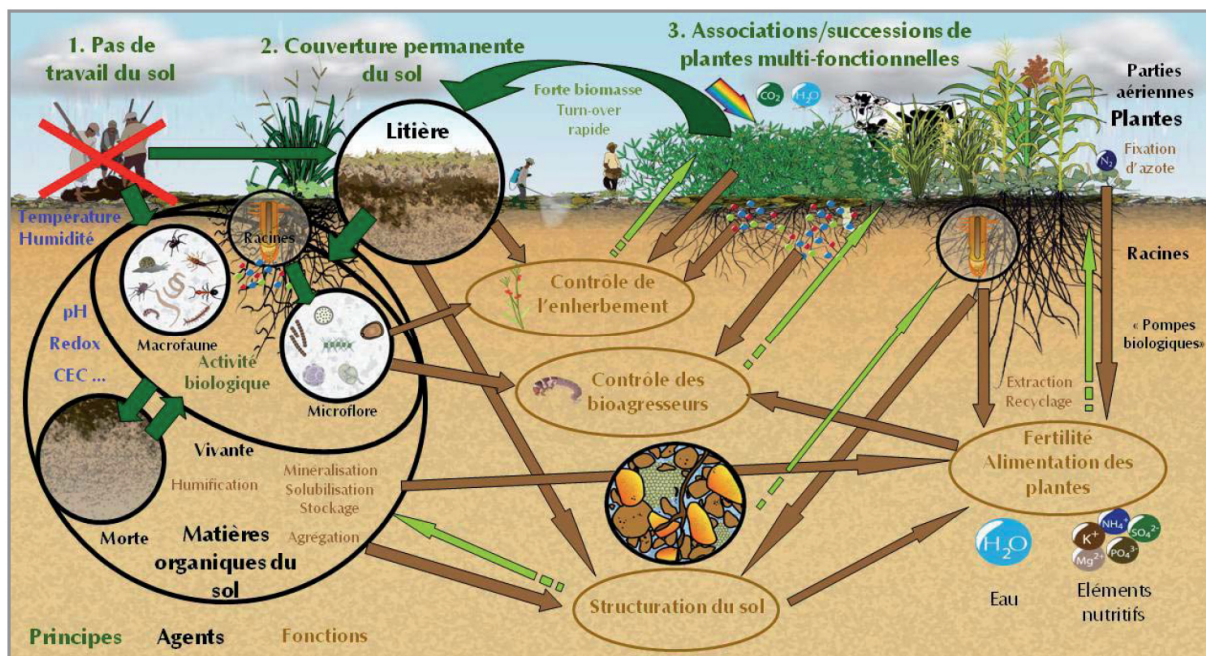


Figure 1.1. Trois piliers des systèmes SCV (Séguy *et al.*, 2009)

Selon Séguy *et al.* (2009) (Figure 1.1), les principes permettant de construire trois “piliers” sont:

- 1) La couverture végétale permanente du sol (alimentée par une forte production de biomasse, et non perturbée en l'absence de travail du sol). L'épaisse litière, ainsi constituée sur la base des trois principes fondamentaux du semis direct, protège le sol et modifie la dynamique de la matière organique, de l'eau et des éléments nutritifs ;



- 2) La diversité des plantes (associées ou en successions dans les systèmes SCV selon le troisième principe) qui remplissent de multiples fonctions. Elles assurent en particulier la production de biomasse aérienne (alimentation de la litière) et racinaire (exploration d'un important volume de sol, production de biomasse souterraine, restructuration du sol, mobilisation et recyclage des éléments nutritifs, etc.) ;
- 3) La forte activité biologique du sol (faune et microflore), rendue possible par les deux premiers "piliers" qui alimentent le sol en matière organique et favorisent le développement des organismes, en:

- ✓ Restructurant et aérant le sol par les systèmes racinaires puissants ;
- ✓ Maintenant l'humidité (faible ruissellement, forte infiltration et stockage, évaporation limitée) et tamponnant les températures par la couverture végétale;
- ✓ Fournissant un substrat énergétique : la matière organique fraîche (au niveau de la litière en décomposition et des racines après la mort des plantes) et les exsudats émis par les jeunes racines (sucres, hormones, enzymes, etc.).

Elle est essentielle dans la genèse des sols et joue un rôle fondamental dans les cycles des éléments nutritifs, aussi bien au niveau de la litière (cycle de la matière organique : minéralisation, humification et séquestration de carbone, accumulation d'azote organique ; solubilisation des éléments nutritifs par oxydation ou chélation) que du complexe absorbant (nature des bases et rétention). Elle renforce le deuxième "pilier" (les plantes multifonctionnelles) qui alimente le premier (la litière).

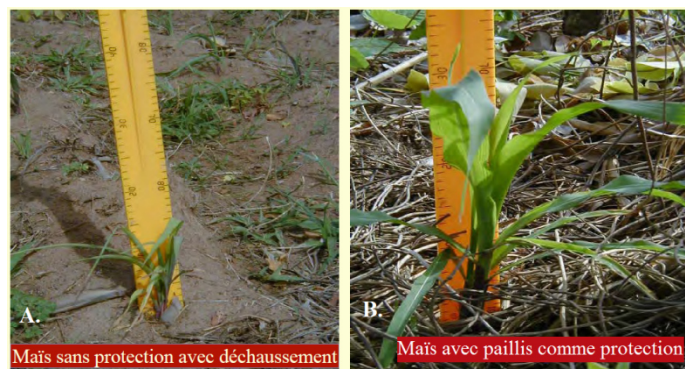


Figure 1.2. : Culture de maïs en système pluvial A) sans protection avec des poches de sécheresse B) avec protection du paillis de la culture précédente (Amadji *et al.*, 2007).

Certains auteurs montrent que l'adoption des principes agro-écologiques permet d'atteindre une résilience par rapport aux chocs climatiques et économiques et même aux attaques des populations ennemies des cultures (Figure 1.2.). D'autres montrent que la diversité biologique et la pérennité du couvert végétal sont deux caractéristiques majeures des écosystèmes naturels qui expliquent leur efficacité environnementale et leur stabilité (Carof, 2006).

Ces trois "piliers" (couverture végétale/litière + plantes multifonctionnelles/racines + activité biologique associée) se renforcent mutuellement. Ils permettent aux SCV, par leur nature et leur quantité sans cesse renouvelées (biodiversité fonctionnelle), de remplir des fonctions multiples et complémentaires, communes à tous les SCV mais d'intensité variable en fonction des systèmes et de leurs conditions de réalisation (qualité et quantité de la biomasse produite et restituée au sol) (Séguy *et al.*, 2009).

#### 1.1.4. Méthode d'analyse, principes et caractérisation des associations

##### 1.1.4.1. Méthode d'analyse des associations

L'évaluation de la performance et du fonctionnement des associations nécessite les comparaisons des références qui sont le plus souvent les couverts mono spécifiques. Dans le cas d'associations en rang (où chaque rang est composé d'une seule espèce), Cruz *et* Soussana (1997) ont proposé un schéma conceptuel permettant de décrire la nature des compétitions par la comparaison de couverts plurispécifiques et mono spécifiques (figure 1.3.).

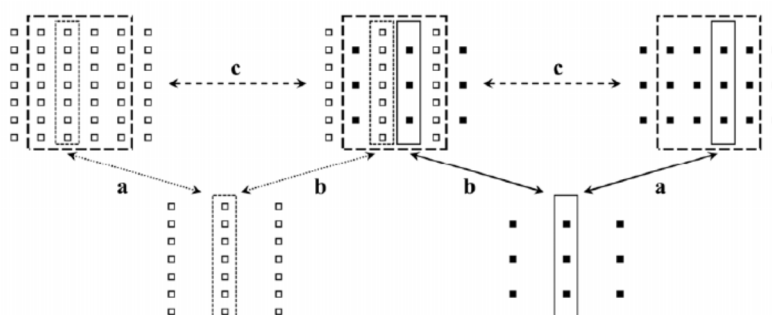


Figure 1.3. : Schéma conceptuel permettant l'étude : a) des compétitions intraspécifiques (rang), b) des compétitions interspécifiques (rang) et c) de l'équilibre entre compétitions intra- et interspécifiques (comparaison sur le rang ou la surface) (Cruz et Soussana, 1997).

### 1.1.4.2. Principes généraux sur le fonctionnement des associations

Les interactions entre espèces, dans les mélanges plurispécifiques, peuvent être représentées comme l'effet d'une espèce sur le milieu et la réponse d'une seconde espèce à ce changement (Vandermeer, 1989 ; Goldberg, 1990) (figure 1.4.). Vandermeer (1989) distingue ainsi deux types de réponses : la compétition qui intervient quand une espèce modifie l'environnement de façon négative pour la seconde (ombrage, extraction d'une ressource qui devient limitante...) et la facilitation lorsque ce changement est positif (allélopathie, effet barrière contre la diffusion de maladies...).

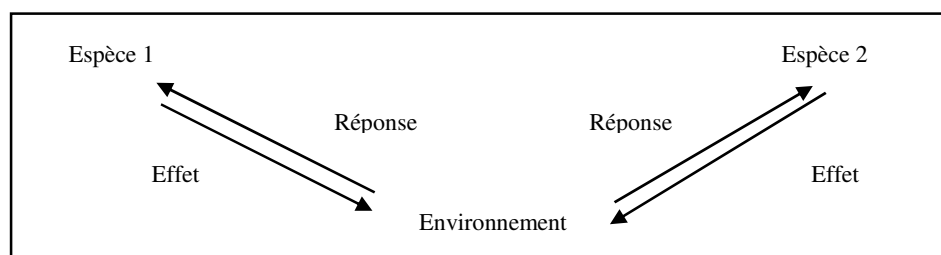


Figure 1.4. : Principe des interactions entre espèces

Un gain de rendement (Vandermeer, 1989) peut se produire en association par rapport aux cultures pures dans deux situations : (1) une espèce modifie négativement l'environnement pour la deuxième espèce mais les deux espèces ensemble utilisent plus efficacement les ressources que lorsqu'elles sont cultivées séparément ; (2) l'environnement d'une espèce est modifiée positivement par la seconde espèce de sorte que la première est facilité par la seconde.

#### a) Gain de rendement et compétition

Bien que traduisant un effet négatif d'une espèce sur l'autre, les phénomènes de compétition peuvent induire un gain de rendement lorsque les espèces associées se complètent et utilisent plus efficacement les ressources que les cultures « pures » (Willey, 1979a, b). Cela se produit lorsque les composantes ne sont pas en compétition (dans le temps, l'espace ou la forme chimique) pour les mêmes ressources traduisant des compétitions interspécifiques inférieures aux compétitions intraspécifiques. Par exemple, dans le cas des associations céréale-légumineuse à graines les deux espèces sont en compétition pour l'azote du sol mais cette compétition peut s'avérer négligeable en raison de la capacité de la légumineuse à utiliser l'azote de l'air (ressource pour laquelle elle n'est pas en compétition avec la céréale) à ceci près

que la fixation symbiotique a un certain coût énergétique pour la légumineuse. Dès lors, l'avantage de l'association est souvent considéré comme positivement corrélé avec le niveau de complémentarité entre les deux espèces associées pour l'utilisation des sources d'azote (Ofori et Stern, 1987 ; Snaydon et Satorre, 1989 ; Jensen, 1996 ; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001a, b). Ceci est particulièrement intéressant à la fois pour les systèmes à bas niveaux d'intrants azotés où l'azote est souvent une ressource limitant et pour les cultures, comme le maïs, ayant des besoins important en azote.

#### **b) Gain de rendement et facilitation**

Au-delà des compétitions qui interviennent presque toujours dans les associations, les phénomènes de facilitation peuvent également jouer un rôle important et induire de gains de rendement (Vandermeer, 1989 ; Hauggaard-Nielsen et Jensen, 2005). Ces mécanismes peuvent prendre des formes très variables, comme la réduction des attaques de maladies (Trenbath, 1993), des adventices (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001c) ou l'augmentation de la disponibilité du phosphore pour la céréale permise par le relargage de protons via la fixation symbiotique de la légumineuse (Cu *et al.*, 2005; Hinsinger *et al.*, 2011 ).

A cela pourrait s'ajouter un troisième type de réponse, à savoir un effet neutre lorsque par exemple une espèce a accès à une ressource non disponible pour la seconde (utilisation de l'azote de l'air par la légumineuse, enracinement plus profond d'une espèce...). Il n'en reste pas moins que ces différentes interactions sont complexes car elles dépendent entre autres de la disponibilité en nutriments, du contexte pédo-climatique, des espèces et des cultivars associés mais aussi et surtout parce qu'elles se produisent en dynamique (Connolly *et al.*, 1990).

#### **1.1.4.3. Compétition pour une diversité de ressources**

Les espèces cultivées au sein d'une association sont sujettes à de nombreuses interactions qui ont un impact significatif sur leurs performances. Ces interactions entre espèces associées se font à la fois au niveau aérien pour l'interception du rayonnement et au niveau racinaire pour le prélèvement de l'eau et des minéraux (Willey, 1979b ; Schwinning et Weiner, 1998). D'autres types d'interactions peuvent intervenir par exemple dans le micro-milieu racinaire à l'échelle de la rhizosphère via des modifications physiques, chimiques ou biologiques modifiant la disponibilité des nutriments tel le phosphore (Hinsinger, 2001 ; Hinsinger *et al.*, 2011) (Figure 1.5.). Ces interactions peuvent aboutir à des variations importantes des

proportions de chaque espèce à la récolte. Les conditions du milieu et les itinéraires techniques appliqués ont un impact direct sur ces interactions. L'arrangement spatial des espèces associées peut ainsi avoir des conséquences sur les interactions inter- et intraspécifiques tout comme les densités de semis (Malezieux *et al.*, 2009).



Figure 1.5. : Fortes carences sur le maïs en compétition avec les adventices non maîtrisées (Husson *et al.*, 2009)

#### **a) Compétition pour la lumière**

Le partage de la lumière entre les espèces associées est un élément crucial du fonctionnement des associations de par l'implication de cette ressource dans de multiples processus (photosynthèse, transpiration, morphogénèse) (Sinoquet *et al.*, 2000). La lumière est une ressource qui doit être captée et utilisée instantanément par la plante au risque d'être définitivement perdue. Trois éléments principaux sont déterminants pour le partage de la lumière entre les espèces associées: la hauteur relative de ces espèces, leur surface foliaire et la capacité de cette surface à intercepter les rayonnements (Louarn *et al.*, 2010).

La compétition implique que l'interception du rayonnement par l'espèce dominante a un impact direct sur la quantité et la qualité de la lumière interceptée par l'espèce dominée. Dans les couverts multispécifiques, les espèces associées peuvent être complémentaires pour l'interception de la lumière de par leur architecture. La réduction de la quantité de lumière reçue par l'espèce dominée peut avoir des effets négatifs sur sa croissance (Caldwell *et al.*, 1987) mais cela peut être au bénéfice de l'espèce dominante et de la production de l'ensemble du couvert (Harris *et al.*, 1987). En outre, la compétition pour la lumière peut affecter aussi la fixation symbiotique de la légumineuse (Naudin *et al.*, 2011). En l'absence de facteurs limitant, le rendement et la production de matière sèche dépendent essentiellement de la quantité de rayonnement absorbé (Loomis *et Williams*, 1963) et ceci aussi bien en culture « pure » (Shibles *et Weber*, 1996 ; Monteith, 1977 ; Kiniry *et al.*, 1989) qu'en association (Natarajan *et Willey*,

1980a, b ; Sivakumar et Virmani, 1980 ; Sivakumar et Virmani, 1984). Or, le rayonnement intercepté varie de l'émergence à la récolte (Sivakumar et Virmani, 1984 ; Watiki *et al.*, 1993) et dépendrait donc de la dynamique des espèces associées et notamment de leur indice foliaire (LAI) (Biscoe et Gallagher, 1977).

### **b) Compétition pour les ressources du sol**

Les ressources du sol incluent principalement les éléments minéraux et l'eau. Les associations de cultures comprenant des légumineuses utilisent à la fois l'azote minéral présent dans le sol et celui présent dans l'atmosphère du fait de la capacité des légumineuses à fixer l' $N_2$  de l'air. Plusieurs auteurs ont montré que dans les cultures d'associations céréale-légumineuse, la compétition racinaire pour l'azote minéral exercée par la céréale augmenterait significativement la part de la fixation symbiotique dans la quantité d'azote accumulée chez la légumineuse par rapport à lorsque cette dernière est cultivée en monoculture (Tofinga *et al.*, 1993; Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2009; Bedoussac et Justes, 2010; Naudin *et al.*, 2010). Différentes études ont mis en évidence l'impact du niveau de la fertilisation azotée sur les performances des associations à base de légumineuses. La compétition pour l'eau est également importante et étroitement liée au partage de la lumière via son implication dans les processus de transpiration (Louarn *et al.*, 2010). La capacité de chacune des espèces associées à acquérir l'eau du sol est plus influencée par leur vitesse d'enracinement, leur distribution racinaire ainsi que la durée de vie des racines que par la capacité physiologique des racines à extraire l'eau (Ozier-Lafontaine *et al.*, 1998). Lorsque cette demande n'est plus satisfaite, différents mécanismes se mettent en place, e. g. fermeture des stomates, réduction de la croissance foliaire (Louarn *et al.*, 2010), qui peuvent eux aussi différer entre espèces. La combinaison de deux espèces peut aboutir à une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau et une plus grande tolérance aux stress hydriques (Allen Jr *et al.*, 1976).

#### **1.1.4.4. Caractérisation de la compétition**

En écologie, les chercheurs ont souvent cherché à caractériser la compétition dans des peuplements complexes par l'utilisation d'indices. Il semble difficile qu'un indice unique de compétition puisse rendre compte de la complexité des interactions. Une étude récente recense une cinquantaine d'indices visant à évaluer l'importance de la compétition (par rapport à d'autres processus), son intensité, ses effets et ses réponses ainsi que ses résultats en termes de

performances (Weigelt et Jolliffe, 2003). La multitude des indices utilisés est certainement liée à la diversité des problématiques étudiées mais probablement aussi à la difficulté de caractériser de façon simple par un indicateur ponctuel un système complexe et dynamique. Weigelt et Jolliffe (2003) insiste sur le besoin d'indices qui soient davantage liés aux processus mis en jeu et tiennent compte de l'aspect dynamique du système et des états du milieu.

Dans le cadre de notre étude, nous avons pris en compte que quelques indices de compétition qui, pour certains, comparent la performance des plantes en cultures purs ou en culture d'association (l'intensité de la compétition), et d'autres indices sont des mesures supplémentaires dérivées des fonctions de rendement-densité (les effets de la compétition) (Weigelt et Jolliffe, 2003). Les indices de compétition tels que le « rendement équivalent » (EY), le « rapport de surfaces des terres équivalentes » (LER), le « coefficient de croissance relative » (RCC ou K), le « rapport d'équivalence superficie-temps » (ATER), le « facteur de compétitivité » (CR), l'« agressivité » (A) et l'indice de la « perte actuelle du rendement » (AYL). Les indices d'avantage monétaire tels que l'« indice d'avantage monétaire » (MAI) et l'« avantage économique de l'association » (IA), ont été aussi pris en compte afin d'effectuer une évaluation économique du système de culture en association (McGilchrist, 1965; Willey, 1979a; Banik, 1996; Ghosh, 2004; Midya *et al.*, 2005, Muyayabantu, 2017).

#### **1.1.5. Espèces et variétés à associer**

Le choix de l'espèce, est un élément essentiel dans l'objectif d'optimiser leur performance. Cette dernière dépend de : i) la complémentarité entre les espèces pour l'utilisation des sources d'azote et ii) la complémentarité spatiale et temporelle des espèces (Trenbath, 1976 ; Tsubo *et al.*, 2001 ; Tsubo et Walker, 2004 ; Poggio, 2005) pour l'utilisation de l'énergie lumineuse (Berntsen *et al.*, 2004 ; Jahansooz *et al.*, 2007). Par ailleurs et pour ces mêmes raisons, pour un couple d'espèces donné, le choix de la variété est un autre levier à considérer. Ce levier sera d'autant plus important que la variabilité intra variétale sera grande. En effet, des variétés présentant des dynamiques de croissance, des hauteurs, des architectures foliaires et des demandes en azote similaires auront *à priori* le même effet sur la culture associée, tout du moins d'un point de vue de l'interception de radiations et de l'acquisition de l'azote. Il en va de même pour le choix des espèces.

### **1.1.6. Production en culture multiple**

La culture multiple est un système où plus d'une culture sont cultivées dans la même parcelle de terrain sur une période dans le but d'obtenir une productivité plus importante. Elle implique aussi l'intensification du système de culture dans un espace donné (Violic, 2002).

En effet, Violic (2002) pense que les cultures impliquées dans ce système peuvent exploiter différemment les ressources et peuvent interagir positivement entre elles. Par exemple : si une des cultures semées avec le maïs est une légumineuse, la céréale pourra bénéficier de l'azote fixé par la légumineuse. Ce système, qui nécessite beaucoup de main d'œuvre, convient aux zones rurales et péri-urbaines à forte population.

#### **1.1.6.1. Différentes formes de cultures multiples**

Les cultures multiples peuvent prendre beaucoup de formes à savoir:

- La culture en mélange est la culture simultanée de deux espèces ou d'un mélange d'espèces non semées en ligne ;
- La culture intercalaire en ligne désigne les cas où seule une des cultures est semée en ligne.
- La culture intercalaire en bande désigne les cas où une ou plusieurs espèces sont cultivées sur des bandes suffisamment larges pour permettre de les cultiver séparément, mais assez étroites pour qu'elles interagissent sur le plan agronomique (Andrews et Kassam, 1976)
- La culture relais est la mise en place de semences ou de plantules entre les rangs d'une culture en train de mûrir de telle façon que la deuxième culture sera bien démarrée avant que la première ne soit récoltée
- La rotation culturale est la succession de cultures se suivant les unes après les autres sur une même parcelle (CGIAR, 1978). La rotation et la diversité biologique ont été longtemps les pierres angulaires du succès des systèmes de production agricole traditionnelle (Francis et Clegg, 1990). Les rotations sont importantes pour : la nutrition des cultures, la condition physique du sol, la lutte contre les mauvaises herbes-maladies-ravageurs et la recherche visant à résoudre les problèmes de l'agriculture de subsistance à bas niveau d'intrants.
- La culture en couloir, qui est un cas spécial de l'agroforesterie (Kang *et al.*, 1985 cité par Fernádes et Davey, 1993), est la combinaison simultanée ou séquentielle d'arbres ou de cultures ligneuses et de productions végétales (ou animales) sur une même parcelle, en appliquant une gestion des cultures compatible avec les pratiques culturales des populations locales (Atta-Krah *et* Kang, 1993).



- La culture associée (céréale-légumineuse). Il s'agit de la culture simultanée de deux espèces ou plus, sur la même surface, pendant une période significative de leur cycle de croissance (Willey, 1979a) (Figure 1.6.). Dans les associations de cultures céréale-légumineuse, les espèces associées établissent des interactions négatives ou positives pour exploiter les ressources du milieu. Les légumineuses établissent des relations symbiotiques avec des microorganismes du sol de la famille des *rhizobiums* qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique grâce aux nodosités des racines et ainsi d'apporter à la plante une grande partie de ses besoins en azote. Cette faculté, qui est propre aux légumineuses, leur confère, lorsqu'elles sont associées à des espèces non fixatrices d'azote comme les céréales, la possibilité de mettre en jeu un processus de complémentarité de niche pour l'azote du milieu.

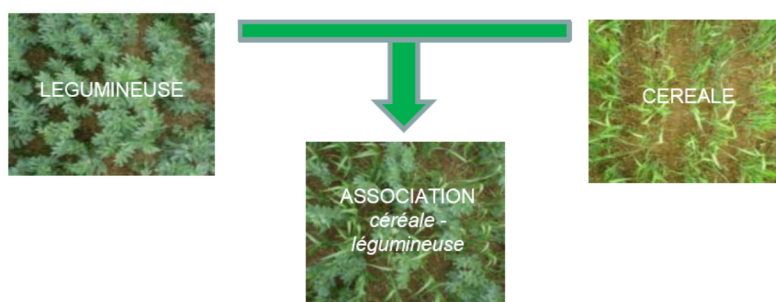


Figure 1.6. Culture associée céréale légumineuses (INERA, 2013)

### 1.1.6.2. Système de culture intercalaire maïs-légumineuse

La déficience en azote est le principal facteur limitant pour l'augmentation du rendement des céréales comme le maïs en Afrique sub-saharienne. Cependant la majorité de paysans utilisent en petite quantité les engrais azotés minéral. Selon Mpepereké et Pompi (2002), la fixation biologique de l'azote (BNF) contribue à des quantités significatives d'azote (N) aux écosystèmes naturels et contrôlés, et offre ainsi, alternativement, une source relativement bon marché de N pour les paysans à faibles ressources. L'exploitation des technologies de BNF dans le système des paysans africains exige l'identification des légumineuses appropriées fixant l'azote, qui ont des avantages multiples pour assurer l'adoption par les communautés rurales à risque d'opposition.

Le système des cultures intercalaires met aussi à profit les caractéristiques spatiales et temporelles des cultures pratiquées (Francis, 1989). La culture intercalaire d'espèces

indépendantes et de systèmes racinaires différents (profonds et superficiels) et dont les hauteurs ne sont pas les mêmes (de petites et de grandes tailles) est importante de point de vue de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et du sol, des éléments nutritifs et de la lumière. Il s'agit d'un système à forte intensité de main-d'œuvre, particulièrement adapté aux systèmes de culture à petite échelle. Dans ces systèmes, les agriculteurs renoncent aux rendements maximaux par unité de surface, pour assurer la diversification des produits agricoles et réduire les risques (Tsay *et al.*, 1989). Par exemple, dans les associations où l'on retrouve le maïs et les légumineuses traditionnelles telles que l'arachide (*Arachis hypogaea*), le niébé (*Vigna unguiculata*) et le voandzou ou pois bambara (*Vigna subterranea*), ces légumineuses se fondent sur le BNF. Elles contribuent à la fertilité résiduelle des sols ont de bas-rendements et sont souvent considérés en tant que des récoltes mineures (Mpepereki et Pompi, 2002).

### **1.1.6.3. Avantage de l'association maïs-légumineuse**

La croissance simultanée de deux cultures (association) est indiquée pour une meilleure utilisation des ressources par rapport à la monoculture (Natarajan et Willey, 1980c ; Sesekabembe, 1985 ; Willey, 1990). Toutefois, il a été observé que la culture d'association fournit une diversité de produits et de revenu pour les agriculteurs (Bradfield, 1974), ce qui réduirait également le risque d'échec sur toutes des récoltes, dues souvent au climat et aux maladies.

Les autres avantages des associations sont les suivants :

- a. La réduction de l'érosion du sol spécialement là où il y a les variétés à croissance rapide et à maturité simple sont semés ensemble ou quand on pratique un écart de semis.
- b. La diffusion des parasites et des maladies est réduite au minimum puisque les cultures voisines sont de moins en moins de même espèce
- c. L'augmentation de l'apport en éléments nutritifs
- d. L'amélioration des propriétés physiques, biologiques et chimiques du sol
- e. La réduction des conditions d'apport d'engrais azoté par la culture de céréale associée (ICRISAT, 1990).
- f. La suppression de la mauvaise herbe (Ballare et Casal, 2000)
- g. L'amélioration de la conservation du sol (Stoop et Staveren, 1986).

- h. La restauration de la matière organique et de l'azote résiduel en particulier avec une légumineuse qui s'avère être pour améliorer la croissance des cultures précédentes (Bagayoko *et al.*, 1998).

#### **1.1.6.4. Association du maïs avec les légumineuses à graines (le niébé et le soja)**

Au Ghana, le projet CIRAD-CRI (Institut de recherche des cultures du Gouvernement canadien) recommandait d'associer du maïs (31 000 pl/ha) avec du niébé (deux lignes semées entre les lignes de maïs, (25 cm entre les poquets de niébé sur la ligne) et de semer le maïs et la culture multiple en même temps (Lafitte, 1987). Edmeades (1990) rapporta des résultats d'expérimentations en multi locales aux champs au Ghana, qui montraient qu'on pouvait atteindre un rapport équivalent au sol (LER) allant jusqu'à 1,5 dans des cultures intercalaires de maïs et de niébé et qu'on obtenait les rendements les plus élevés avec des densités de maïs de 25 000 à 40 000 plants/ha et de niébé de 40 000 à 60 000 plant/ha, avec les deux cultures semées en même temps.

En ce qui concerne la rotation, ses résultats préliminaires montrèrent qu'en l'absence d'engrais, les rendements du maïs qui suivait un maïs chutaient significativement, mais que cette chute de rendement pouvait être complètement compensée par des apports d'engrais ou par une culture de niébé. Les niébés améliorent le rendement du maïs par l'azote qu'ils fixent et par des améliorations non précisées des conditions du sol (Paliwal, 2002).

L'Institut international de l'agriculture tropicale (IITA), avec un mandat global pour le niébé, avait travaillé à l'amélioration des variétés de niébé aussi bien que sur l'amélioration des systèmes de cultures pour augmenter la productivité totale avec l'utilisation limitée des intrants commerciales. La stratégie a été d'étudier le rôle du niébé dans les principaux systèmes de cultures, d'identifier les contraintes de production dans les systèmes traditionnels et puis de développer les variétés améliorées de niébé ainsi que des systèmes améliorés (Singh *et al.*, 1997).

Le système de culture d'association maïs/niébé a été sujet de diverses études en vue d'augmenter l'efficacité du système. Olufajo (1998) rapporte une diminution du nombre de gousses de niébé en culture pur et en association avec une augmentation du nombre de plants de maïs. De même, Huxley et Maingu (1978), Adetiloye (1986) et Alhaji (2008), rapportent tous que les effets ombrageant du maïs en association avec le niébé, réduits défavorablement le nombre de ramification et de gousses par culture de niébé. Contrairement à la réduction du

rendement du niébé en culture d'association, il a été rapporté que le niébé à maturation tardive est plus concurrentiel et réduit le rendement du millet dans le système de culture d'association millet/niébé (N'tare et William, 1992).

En outre, Terao *et al.* (1997), Nelson et Robichaux (1997), ont notés que la propagation du niébé est remarquable sous association dû au système racinaire très important et un transfert efficace très élevé. L'amélioration photosynthétique du rendement du niébé en culture d'association est due à la différence temporelle du début de floraison, normalement vers la fin de la saison de pluie, et la maturation des graines pendant la saison sèche, période où les feuilles du maïs associés ont commencé à sécher (Steele et Mehra, 1980).

Les cultures intercalaires de maïs et de soja ont joué autrefois un rôle important dans certaines parties du monde tropical comme le Brésil, bien que leur usage soit actuellement limité (Barros, 1991). Le soja, qui est une légumineuse relativement nouvelle en Afrique, répond bien à la bactérisation des rhizobiums et fixe de grandes quantités d'azote même dans les sols marginaux (Kasasa, 1999). Les avantages multiples du soja incluent l'amélioration de la fertilité du sol, la nutrition en protéine pour les humains et le bétail, ainsi que le revenu en espèce à la vente des graines et des sous-produits. Le soja est maintenant cultivé dans plusieurs régions de l'Afrique sub-saharienne en général et en RDC en particulier, où il apporte les contributions significatives à la vie rurale. En raison de la capacité limitée de production d'inoculum dans la plupart des pays africains, les variétés de soja apparentées à une nodulation effective avec des rhizobiums indigènes ont été, avec succès, développées et démontrant leur potentiel pour donner les avantages du BNF aux communautés pauvres et marginalisées (Mpepereké *et al.*, 2000).

L'étude agronomique conduite dans les zones de la savane de Guinée du Nigéria a prouvé que le rendement de maïs s'améliore dans un système de rotation avec du soja. Le rendement des céréales cultivées après des légumineuses augmente presque toujours, souvent pas moins de 80%, comparé aux céréales cultivées après des céréales. Les expériences qui ont été menées pendant 2 années dans les domaines de certains fermiers pour évaluer l'effet résiduel de deux cultivars de soja (TGX 1485-1D et TGX 1448-E) sur le maïs a prouvé que le rendement en grain de maïs cultivé après le soja a augmenté avec une moyenne de 25% (Sanginga *et al.*, 2001).

On a présumé beaucoup de facteurs qui pourrait influencer l'accroissement du rendement en grain de maïs une fois développés dans la rotation avec du soja. Ceci concerne l'augmentation de la disponibilité en azote après soja et des autres effets de la rotation, tels que, par exemple, la réduction des maladies, etc.

Carsky *et al.*, (2001) ont publié sur la réduction du parasitisme de *Striga hermonthica* sur le maïs après le soja comparé à la culture contrôlée de sorgho. Il y aurait beaucoup plus d'avantages à introduire la légumineuse à graine dans la monoculture de céréale que ce que nous attendons des légumineuses comme contribution nette parce que l'alternative céréale épuise le sol en azote (Sanginga *et al.*, 2001).

#### **1.1.6.5. Association du maïs avec les légumineuses fourragères**

Contrairement à la culture intercalaire de légumineuses à graines et de plantes non légumineuses (Okigbo et Greenland, 1976) la production des légumineuses fourragères est relativement inhabituelle en Afrique (Norman, 1982). Toutefois, le concept n'est pas étranger au paysan africain, et cela devrait faciliter l'introduction de ces plantes dans les systèmes culturels traditionnels (Nnadi et Haque, 1988). La nécessité de garder au sol sa fertilité et de le protéger contre l'érosion due à de fortes pluies a amené les cultivateurs à planter des légumineuses vivaces à croissance rapide entre les rangées de la culture principale. Outre qu'elle protège le sol, la légumineuse en augmente la fertilité du fait de la minéralisation des feuilles tombées chaque année et de l'accumulation d'azote combiné due à la fixation symbiotique par les nodosités des racines (Roberge et Toutain, 1999). Malgré de nombreux travaux et acquis techniques, il reste très difficile à vulgariser et d'intégrer les plantes fourragères dans les systèmes de production en Afrique. Les modèles, mis au point et plus ou moins bien maîtrisés dans des dispositifs expérimentaux contrôlés, sont rarement adoptés en milieu paysan. Les raisons de ces échecs sont d'ordre technique ou socio-économique. Elles varient, bien sûr, avec les sociétés paysannes et les écologies concernées. Il est donc primordial de les comprendre et de les prendre en compte pour que les résultats de la recherche soient réellement porteurs de développement (Lhoste, 1999).

### **1.2. Modèle et simulation des cultures associées**

#### **1.2.1. Concept de base**

Malgré une large variabilité de comportement des plantes (plante héliophile et plante ombrophyle), plantes de jours longs ou neutre, plantes à croissance déterminée ou indéterminée, etc.), les principes de base pour leur croissance et par conséquent leur production ultérieure ont

une validité très générale. La lumière est en effet impliquée dans les mécanismes d'assimilation ainsi que dans la fourniture de squelettes carbonés, nécessaires au fonctionnement des nodosités développées par les légumineuses. Le rayonnement fournit en effet la source d'énergie nécessaire à l'accumulation et l'allocation de la biomasse, et ce, dès les stades de développement les plus précoces. Au-delà de cet aspect trophique pour le carbone, la lumière constitue également un ensemble de signaux, dits « *photomorphogénétiques* », impliqués dans la morphogénèse aérienne et souterraine des plantes (Varlet-Granchet *et al.* 1993 ; Barrillot *et al.*, 2010). Pour comprendre le fonctionnement global d'une plante ou de toute une population de plante, l'analyse quantitative de la croissance et du développement des plantes, ainsi que le formalisme mathématique par l'approche moderne de la modélisation sont devenus à partir des années 1920, des outils fondamentaux en agriculture et en botanique (Hassani, 1994).

#### **1.2.1.1. La croissance**

La croissance est l'augmentation continue de toutes les dimensions de la plante : longueur, largeur, diamètre, surface, volume et masse. Cette augmentation est mesurable dans le temps et fait intervenir deux phénomènes concomitants qui sont (1) la croissance en dimension de chaque organe après leur initiation (la croissance au sens strict) et (2) la multiplication du nombre d'organes (lié au développement). La courbe de croissance typique d'un organe ou d'une plante entière suit une allure sigmoïde, représentant généralement trois phases distinctes : (1) une phase initiale de nature exponentielle ; (2) une phase linéaire de croissance active ; (3) une phase plateau caractérisée par la cessation de croissance. Ce phénomène est surtout observé dans le cas de la croissance d'un peuplement végétal cultivé, caractérisé par une seule espèce, appartenant à une seule variété cultivée pour récolter un produit spécifique désiré par l'homme. Dans le cas de la phase initiale de croissance (cellule, organe, plante entière, peuplement), cette dernière suit une loi exponentielle positive tant qu'il n'y a pas de limitations intrinsèques à la plante ou liées à l'environnement (figure 1.7.a). Dès que la limitation est imposée, la croissance dans le temps est modifiée selon une courbe sigmoïde ou logistique (figure 1.7.b) (Hassani, 1994).

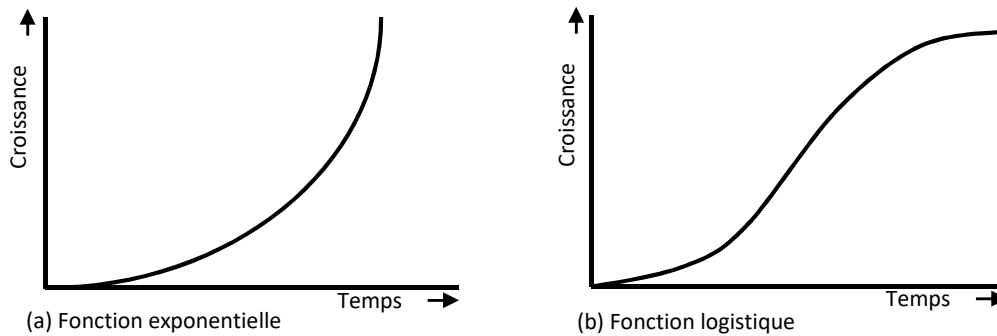
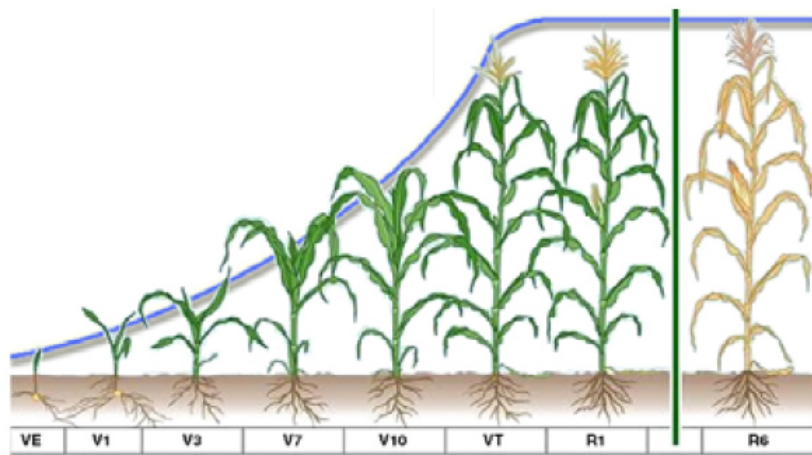


Figure 1.7. Allure générale de la courbe de croissance des plantes (Hassani, 1994)

De nombreuses études sont consacrées à la modélisation de la croissance des cultures en relation avec les conditions environnementales. Les performances croissantes des ordinateurs modernes permettent le développement de modèles permettant de reproduire sous forme virtuelle la croissance de la plante en prenant en compte un grand nombre de différents facteurs et processus interagissant entre eux (Li, 2013 ; Lukombo *et al.*, 2013 ; Tshiabukole *et al.*, 2019).

### 1.2.1.2. Le développement

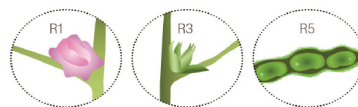
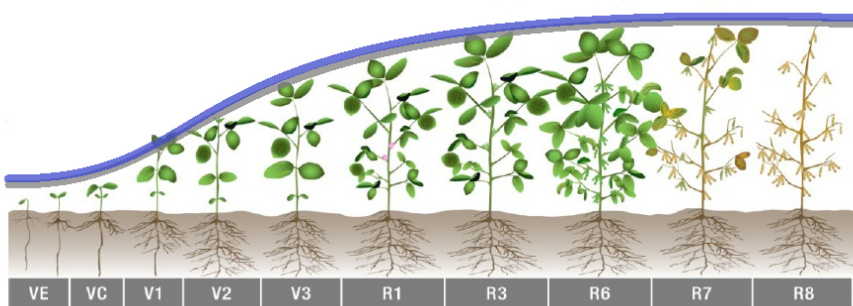
Le développement représente l'ensemble des transformations qualitatives de la plante liées à l'initiation et à l'apparition de nouveaux organes. Contrairement à la croissance, le développement est un phénomène repérable dans le temps. Il s'agit d'événements discrets qu'on peut observer à un instant donné : germination des graines, émergence des plantules, initiation florale, maturité des graines, mort du végétal. Comme pour la croissance, on distingue la phase de développement végétatif (la plante passe de l'état juvénile à un état de ramification et de multiplication des organes végétatifs : feuilles, tiges, racine) et la phase de développement reproducteur (marqué par la fabrication d'organes d'accumulation de la matière sèche) (Figure 1.8.a et 1.8.b). Conventionnellement, on utilise des échelles quantitatives permettant de caractériser les périodes de développement et les stades de développement dans chaque période par des nombres arbitrairement fixés, plus particulièrement dans le cas des céréales (Hassani, 1994).



**Légende :**

- VE : maïs pointant (coléoptile)
- V1 : 1 feuille
- V3 : 3 feuilles
- V7 : 7 feuilles
- V10 : 10 feuilles
- VT : floraison mâle
- R1 : apparition des soies
- R2 : gonflement des grains
- R3 : stade laiteux des grains
- R4 : stade pateux des grains
- R5 : stade denté des grains
- R6 : maturité complète des grains (point noir)

Figure 1.8.a : Stades de croissance du maïs (McWilliams et al., 1999).



**Légende :**

- VE : apparition des cotylédons
- VC : cotylédons totalement ouvert et feuilles unifoliées déroulées
- V1 : 1<sup>ère</sup> feuille trifoliée
- V2 : 2 feuilles trifoliées
- V3 : augmentation du nombre des nodules sur les racines
- R1 : début floraison
- R3 : 1<sup>ère</sup> gousse de 5mm de longueur
- R6 : grossissement des graines
- R7 : début de la maturité
- R8 : pleine maturité (95% des gousses ont atteint leur couleur)

Figure 1.8.b : Stades de croissance du soja (McWilliams et al., 1999).



### **1.2.2. Définition d'un modèle**

On peut définir un modèle comme étant une représentation simplifiée d'une réalité complexe. Au terme « modèle » on associe le vocable « système » qui représente la réalité qu'on se propose de modéliser. Un système peut avoir plusieurs sous-systèmes et composantes qui ont des interconnexions qui correspondent aux différents niveaux d'étude. En agronomie, le système est représenté par le complexe « climat-sol-plante » dont le comportement est modifié par les techniques culturales appliquées. En d'autres termes, le système est le peuplement cultivé dans des conditions de sol, de climat et de technique données. La modélisation consiste alors en l'intégration des connaissances d'ordre micro-météorologique, agronomique et physiologique dans un cadre conceptuel plus ou moins élaboré selon le degré de simplification du système étudié (Hassani, 1994).

Selon Hassani (1994), la conception d'un modèle est liée aux objectifs qui lui sont assignés (explorer-expliquer-intégrer-prévoir). Un modèle peut être de nature purement conceptuelle (image mentale qu'on se fait de la réalité), de nature physique ou de nature mathématique. Dans tous les cas, le formalisme mathématique est un outil précieux pour décrire les caractéristiques du système modélisé et pour résumer le modèle qui le représente.

### **1.2.3. Types de modèles**

En privilégiant le type d'approche utilisé, on peut distinguer deux grandes catégories de modèles : les modèles empiriques et les modèles explicatifs. Le modèle empirique est simple dans sa structure mathématique et poursuit des objectifs limités. Le modèle explicatif est plus complexe parce qu'il intègre les principaux processus intervenant dans le fonctionnement du système étudié. D'autres critères sont utilisés pour différencier ces deux catégories de modèles : échelle de temps (dynamique ou statique), source de données (expérimentale ou statistique), but poursuivi (analyse, explication et/ou prévision) et application du modèle (outil de recherche ou outil de diagnostic) (France et Thornley, 1984).

Cependant, il n'y a pas de limite claire entre la catégorie des modèles empiriques et celle des modèles explicatifs ou « mécanistiques », donnant ainsi un modèle semi-empirique, intermédiaire dans sa structure et sa complexité entre un modèle empirique simple et un modèle

physiologique plus élaboré. Par exemple, le modèle basé sur l'efficacité d'interception de la lumière et de son utilisation par un couvert végétal. Monteith (1977) propose un modèle selon lequel la croissance des plantes et la production de matière sèche peut être analysés en terme de :

- rayonnement incident ;
- fraction de ce rayonnement qui est interceptée par le couvert végétal ;
- efficacité d'utilisation de la lumière par le couvert.

#### **1.2.4. Simulation des cultures**

Les modèles de simulation des cultures sont définis comme des programmes informatiques qui simulent la croissance des cultures par intégration numérique des processus constitutifs (Sinclair et Seligman, 1996). Plus précisément, il s'agit d'un programme informatique décrivant la dynamique de la croissance d'une culture par rapport à l'environnement, opérant sur un pas de temps un ordre de grandeur inférieur à la longueur de la saison de croissance, et avec la capacité de variables de sortie décrivant l'état des cultures à différents points dans le temps (par exemple de la biomasse par unité de surface, stade de développement, le rendement, la teneur en azote de la canopée, etc.). Ces modèles de culture miment la croissance des cultures et de l'évolution pour un ensemble donné d'intrants ou de l'information du sol, du climat et des paramètres du modèle de culture spécifique (Hassani, 1994).

##### **1.2.4.1. Simulation de la surface foliaire**

La plupart des modèles de fonctionnement de cultures considèrent maintenant que la production de matière sèche du couvert peut être estimée à partir du rayonnement solaire utile à la photosynthèse qu'il capte (Monteith, 1972 ; Ruget *et al.*, 1996). Or, la proportion de rayonnement intercepté est estimée à partir de la surface foliaire qui est donc une variable importante pour la détermination de la production d'une culture (Ruget *et al.*, 1996).

La surface des feuilles vertes joue un rôle essentiel dans différents aspects de la croissance et du développement des cultures. La surface foliaire détermine la fraction de rayonnement incident photosynthétiquement actif incident (PAR) interceptée par le couvert végétal et

finalement la production de matière sèche (Hassani, 1994). Les feuilles constituent également la principale voie de transpiration et de récupération du carbone. Par conséquent, la simulation de la surface des feuilles vertes pendant la saison de croissance a été une composante essentielle du modèle de croissance des cultures (Yang *et al.*, 2009).

La surface foliaire d'une plante est la somme des surfaces de chacune de ses feuilles. Les feuilles ont fini leur croissance lorsque leur ligule est apparue : celles qui sont ligulées ont donc une surface fixée, tandis que celles qui sont en croissance ont une surface qui évolue au fur et à mesure de leur étalement. Elles forment le « corne de feuilles » (Ruget *et al.*, 1996). La surface des feuilles ligulées peut être estimée à partir de mensurations simples, en raison de leur forme et de leur dimension. La forme des feuilles entièrement développées a été décrite par des expressions analytiques reliant longueur et largeur (arcs de parabole : Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978 ; Prévot *et al.*, 1991 ; arcs de sinusoides : Edmeades et Daynard, 1979 ; Sanderson *et al.*, 1981), qui par intégration, permettent de calculer leur surface.

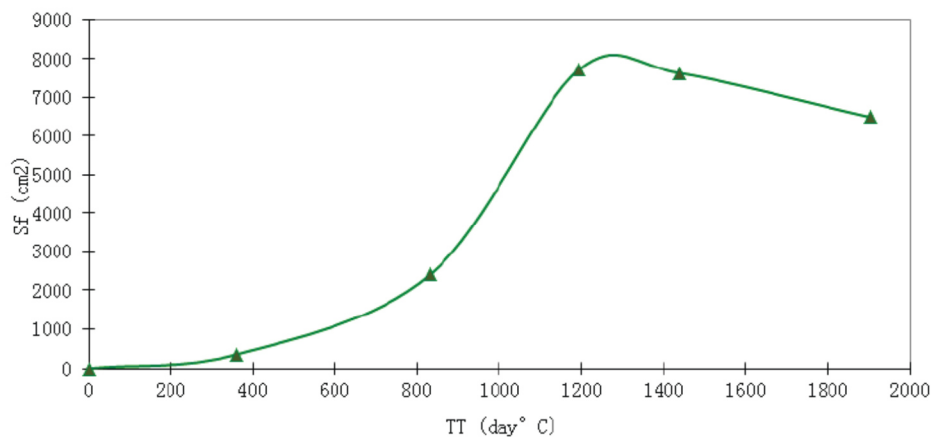


Figure 1.9. : L'évolution de la surface foliaire d'une plante en fonction du temps thermique (Li, 2013).

Dans certains modèles (CERES, GOSSYM, par exemple), la surface foliaire est calculée à partir de la biomasse divisée en feuilles, à l'aide du concept de surface foliaire spécifique. Certains pensent qu'il est approprié de modéliser l'expansion des feuilles indépendamment du bilan carbone de la plante (Tardieu *et al.*, 1999). Dans les modèles proposés par Arkebauer *et al.* (1995) et Fournier et Andrieu (1998), l'expansion des feuilles et la sénescence des feuilles ne dépendent que du temps thermique (Figure 1.9.) et sont simulées séparément pour chaque feuille. Cette méthodologie a été adoptée dans certains modèles récemment développés

(Lafargea et Tardieu, 2002; Guillermo *et al.*, 2003; Lizaso *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2004; Fleisher et Timlin, 2006) pour différentes cultures telles que le tournesol, la pomme de terre et le maïs. Ces nouveaux modèles offrent des moyens plus flexibles et robustes dans la simulation de la surface des feuilles.

#### **1.2.4.2. Simulation de l'indice de surface foliaire**

La quantité de feuilles d'un couvert végétal est classiquement décrite par son indice de surface foliaire ou Leaf Area Index (LAI), paramètre primordial dans le transfert radiatif puisqu'il est la principale source d'interaction avec le rayonnement solaire. Le LAI a tout d'abord été défini comme la surface totale d'une face des feuilles par unité de surface du sol (Watson 1947). Cette définition ne convient plus dès lors que les feuilles ne sont pas plates comme les aiguilles de conifères par exemple. De nombreuses études définissent alors le LAI comme la projection de surface foliaire au sol (Smith, 1991 ; Bolstad et Gower, 1990). Ces deux définitions peuvent amener à des résultats différents selon la forme des feuilles (sphères, cylindres). Chen et Black (1992) suggèrent d'abandonner la définition basée sur la projection au sol, trop dépendante de la forme des objets, et propose une définition du LAI qui correspond à la moitié de la surface foliaire interceptrice développée par unité de surface du sol. Ce paramètre couramment exprimé en m<sup>2</sup> de feuilles par m<sup>2</sup> de sol est sans dimension. Il ne dépend pas des inclinaisons, orientations et éventuelles superpositions foliaires. Si l'on considère les autres éléments du couvert (tiges, troncs, fleurs etc..), on parlera plutôt de Plant Area Index (PAI).

Les valeurs de LAI sont très variables d'un couvert à l'autre, de 0 pour un sol nu, pouvant dépasser 15 pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères (Schulze, 1982) ; elles atteignent rarement plus de 8 dans nos forêts tempérées et varient par exemple de 2 à 6 pour des cultures annuelles (Beadle, 1993).

L'indice foliaire dépend de l'espèce, du stade de développement, des conditions du site, de la saison ainsi que des pratiques culturales. C'est un paramètre dynamique qui varie au jour le jour et très documenté dans le cas des forêts (Welles, 1985, Le Dantec *et al.*, 2000 ; Tuner *et al.*, 2000). Il est calculé à partir de densité de plantes et la surface foliaire de toutes les feuilles vertes) la floraison (Ruget, 1991).

Beadle (1993) rapporte les chiffres entre 2 et 6, l'indice foliaire pour les cultures annuelles. Ces mesures peuvent aller de 0,4 à 4,1 et Beadle (1993) impute ces différences aux méthodes de

mesure. Il en existe deux : les méthodes directes et les méthodes indirectes (Fassnacht *et al.*, 1994 ; Kussner et Mosandi, 2000). Les méthodes directes sont les plus précises mais prennent du temps et ne peuvent être fiables qu'à petite échelle comme dans le champ. Elles ne sont plus applicables dans le cas de dynamique spatio-temporelle de suivi des forêts, par exemple (Chason *et al.*, 1991). Les méthodes directes sont utilisées dans le calibrage des méthodes indirectes (Jonkheere, 2004). Parmi les méthodes directes, on a des méthodes destructives qui sont plus précises où le calcul du LAI nécessite le prélèvement d'un échantillon suffisamment grand pour être représentatif car le LAI peut être fortement variable à l'échelle décimétrique, voire métrique. Cependant, il faut également mesurer des feuilles dans un laps de temps assez court car leur dégradation (dessèchement, pourriture), les rendant impropres à la planimétrie, est rapide (Chen *et al.*, 1997), ce qui fausse les résultats. On les utilise dans le calibrage des méthodes indirectes (Cutini *et al.*, 1998). Les méthodes indirectes sont documentées par Jonkheere *et al.*, (2004), et concernent plus les suivis de grandes superficies.

Certains modèles sont utilisés à des fins de comparaison avec les modèles spécifiques, ou pour les études par simulation. Ce sont également des modèles empiriques dont les paramètres ont une signification biologique. Ainsi, pour le peuplement mono-spécifique, les variables morphologiques du modèle (LAI, Hauteurs) caractérisent le couvert dans son ensemble (Jones et Kiniry, 1986 ; Grant et Hesketh, 1992 ; Bouman *et al.*, 1996 ; Brisson *et al.*, 1998). Il semble donc nécessaire de développer une modélisation du fonctionnement du couvert capable de prédire de façon mécaniste le développement d'un ensemble de plants en compétition, à partir des règles de morphogenèse invariante.

### 1.3. Le milieu d'étude

#### 1.3.1. Situation géographique

Notre site d'étude était situé dans la zone agro-écologique qui va de l'Océan Atlantique à Kiyaka (Province du Kwilu). A ces différents Zones agro-écologiques correspondent différentes spéculations agricoles vivrières, commerciales et industrielles, ainsi que des façons culturales (REAFOR, 2008).

Les travaux de recherche se sont déroulés au centre de recherche de l'INERA/Mvuazi, dans le territoire de Mbanza-Ngungu, dans la province du Kongo-Central, en République Démocratique du Congo. Le choix porté sur ce territoire a pour but l'obtention des résultats dans la zone agro-écoclimatique du Sud-ouest de la RD Congo (figure 1.10).

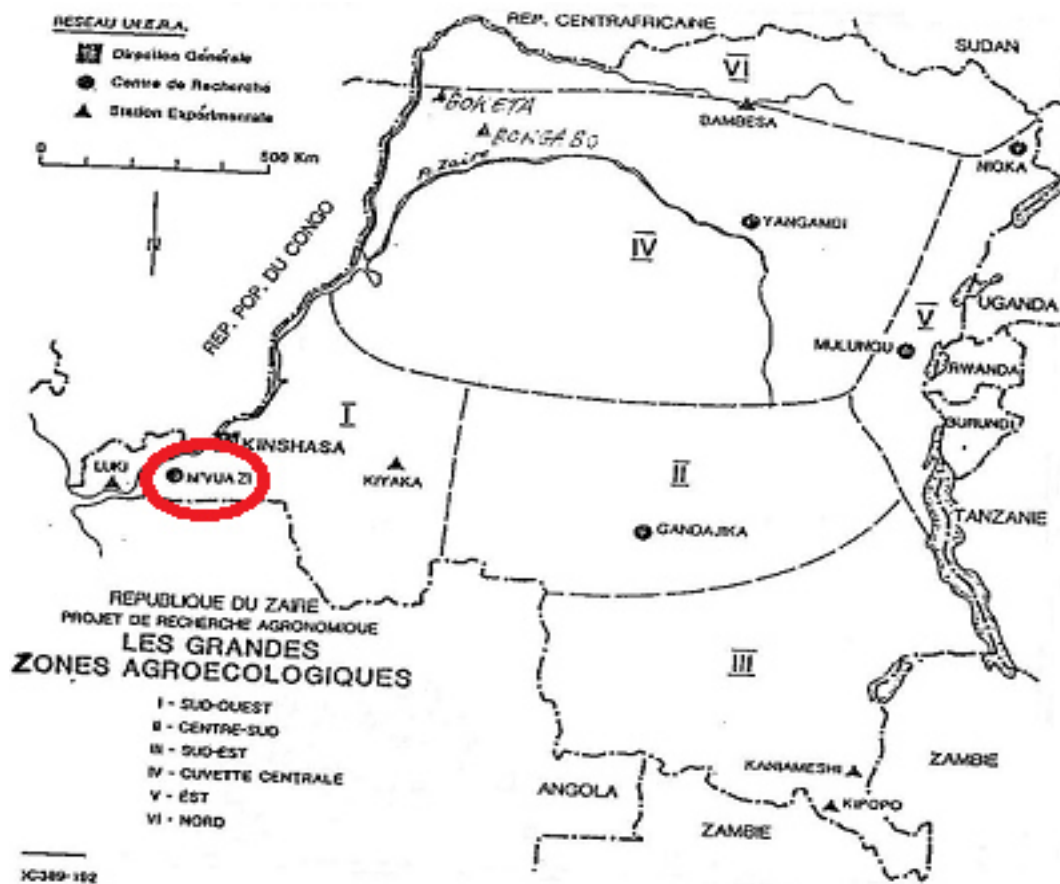


Figure 1.10. Carte des zones Agroécologiques de la République Démocratique du Congo (REAFOR, 2008)

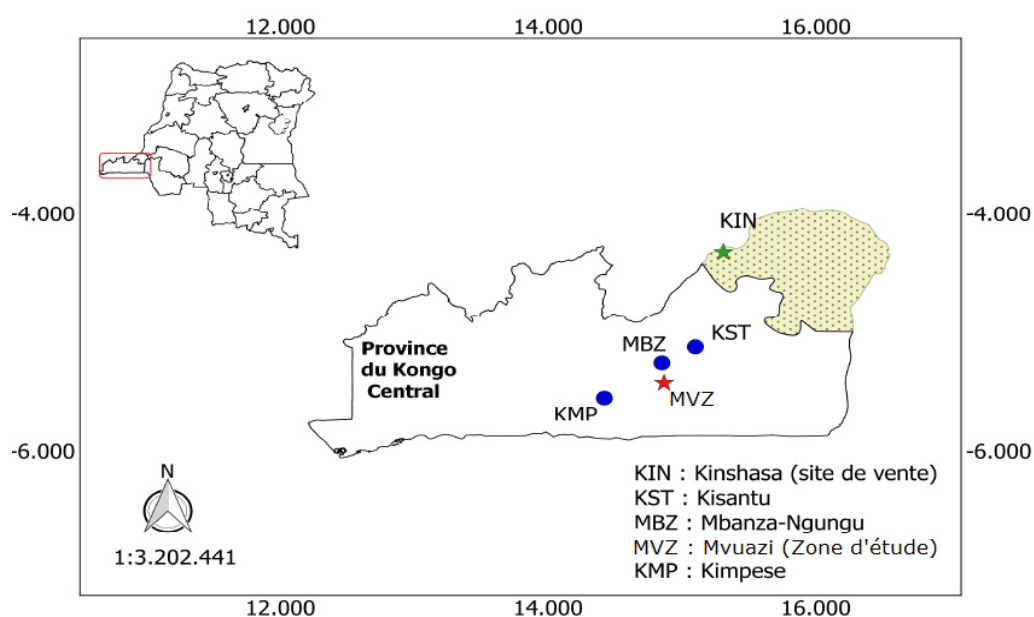


Figure 1.11. : Carte de la RD Congo et du Kongo Central, Centre de Recherche INERA/Mvuazi (Tshiabukole, 2018).

Le Centre de recherche de l'INERA/Mvuazi est situé à 14°54' de longitude Est de 5°21' de latitude sud, à une altitude de 407 m (figure 1.11.). Le sol de la vallée de Mvuazi développent un horizon humifère épais de 15 à 25 cm, noir (à l'état frais) ou brunâtre (à l'état sec), à structure subanguleuse ou grumuleuse bien prononcée. Cet horizon est souvent remanié par les cultures (figure 1.12.).

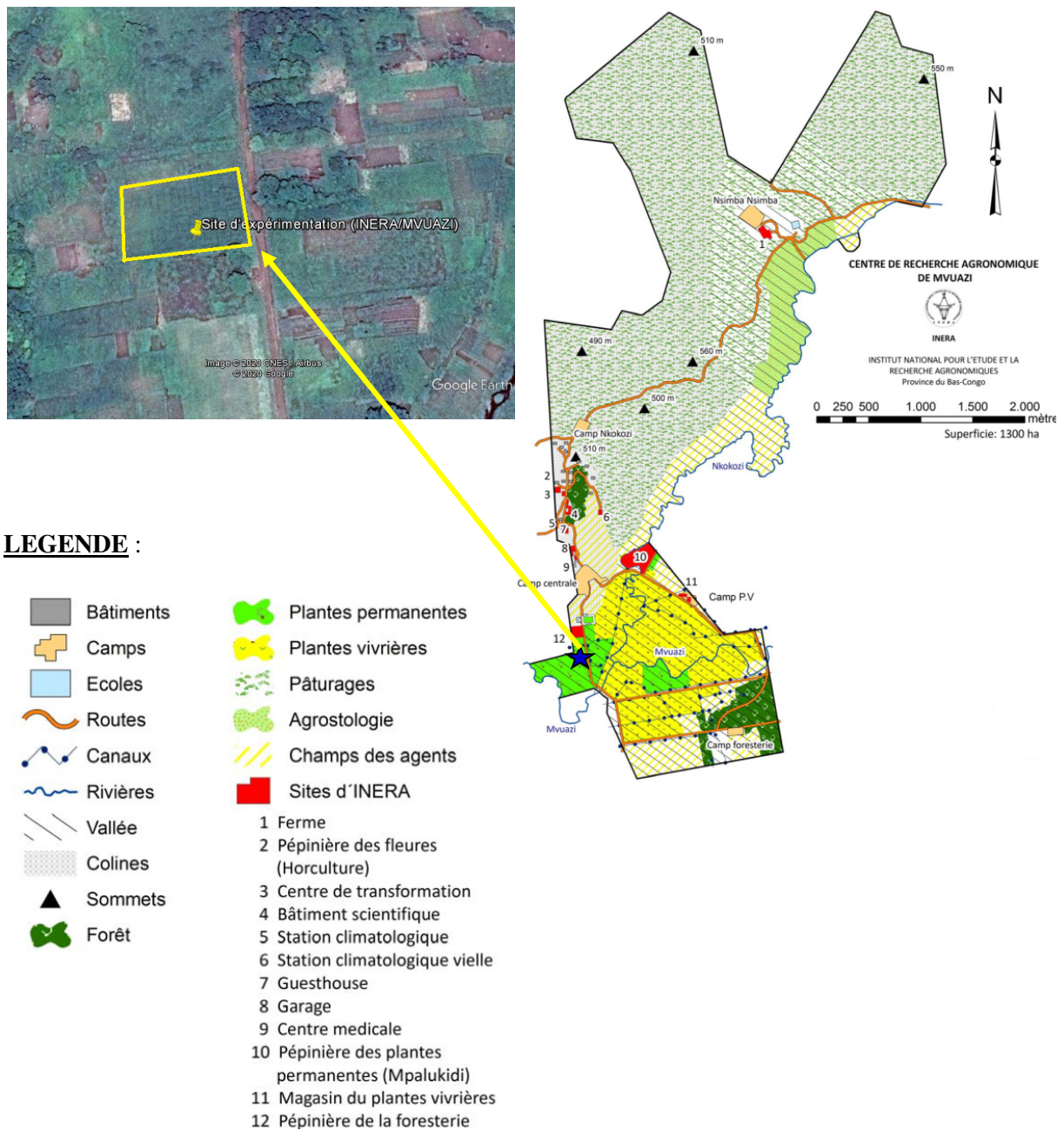


Figure 1.12. Carte du Centre de Recherche de Mvuazi (Zone d'étude) (Source : Valentin *et al*, 2009)

### 1.3.2. Climat

D'après la classification de Köppen (1936) la région de Mvuazi et ses environs appartiennent au type climatique Aw4. On y observe une saison sèche d'une durée moyenne de 120 jours environ à la longitude de Kinshasa, et croissant du Nord-est vers le Sud-ouest pour dépasser 160 jours sur la côte atlantique ; sa durée moyenne est de l'ordre de 130 jours au voisinage de



Mvuazi. La lame d'eau annuelle moyenne est voisine de 1506 mm répartie en deux saisons avec les moyennes de 598,2mm et 577,3mm respectivement en saison A et saison B (Tshiabukole *et al.*, 2016). Le régime pluviométrique annuel, comme il ressort de la figure I.11., accuse une double périodicité, les maxima se situant en avril et en novembre, le minimum secondaire en janvier. La saison A va de mi octobre à fin janvier et la saison B va de mi-mars à mi-mai. La saison sèche débute en moyenne entre le 20 et le 25 mai et se termine vers le 30 septembre. A Mvuazi, les moyennes mensuelles de la température journalière de l'air sont comprises entre 24,5° et 25,5°C en saison des pluies et entre 21,5°C et 23,5°C en saison sèche ; les températures maxima et minima moyennes journalières sont toutes deux plus faibles en saison sèche qu'en saison des pluies. On notera que la température de l'air peut atteindre 35°C à 37°C et descendre en saison sèche aux environs de 10°C. L'oscillation thermique journalière s'éteint rapidement dans le sol (Figure 1.13).

La saison pluvieuse a deux maxima de précipitation qui se situent, d'une part, en mars – avril et, d'autre part, en novembre – décembre. La pluviométrie moyenne annuelle est de 1375 mm et la température moyenne pendant la saison des pluies varie entre 21,5° et 23,5°C (Figure 1.13.).

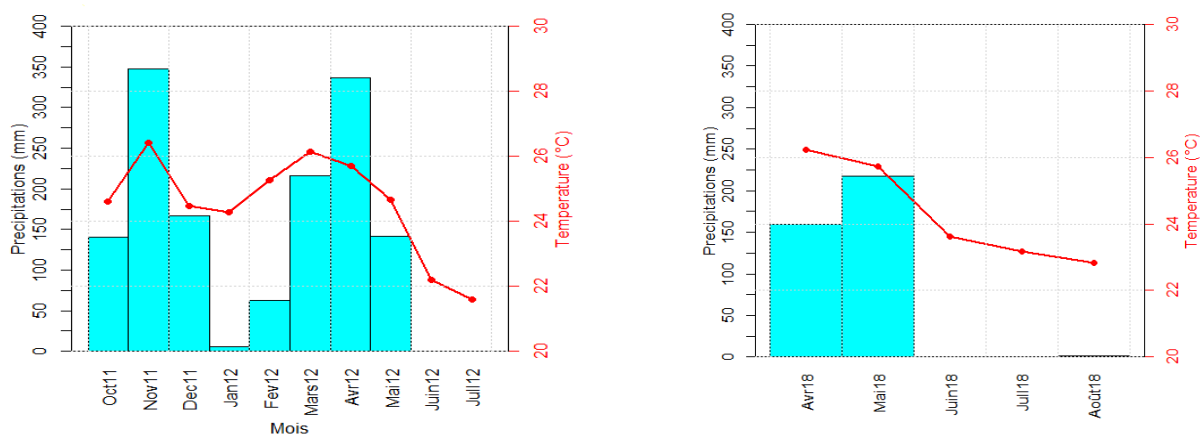


Figure 1.13. Précipitations mensuelles et température moyenne de l'air pendant la période des expérimentations (campagne 2011-2012 et saison B 2018).

Tshiabukole *et al.* (2016), ont établi que plusieurs indices permettaient de caractériser la sécheresse météorologique au sein de la savane du Sud-ouest de la RD Congo. Ils ont montré que cette zone était susceptible à la sécheresse de pleine saison et de fin de saison pluvieuse.

Les années sèches étaient formées de deux ou trois années consécutives. La zone de Mvuazi connaît une tendance de baisse de nombre des jours des pluies au cours des 50 dernières années. Les températures moyennes annuelles indiquent qu'il y a bel et bien hausse de près d'un degré Celsius, soit un réchauffement important. Le raccourcissement de périodes des pluies combiné aux intensités élevées des précipitations causent souvent la rupture brusque de pluies entraînant les sécheresses précoces de fin des saisons.

### **1.3.3. Sol et végétation**

#### **1.3.3.1. Les sols de Mvuazi**

Les sols de Mvuazi développent un horizon humifère épais de 15 à 25 cm, noir (à l'état frais) ou brunâtre (à l'état sec), à structure subanguleuse ou grumeleuse bien prononcée. Cet horizon est souvent remanié par les cultures. L'horizon humifère passe progressivement à un sol argilo-limoneux, argilo-sableux, bien structuré et à consistance légèrement plastique. La couleur va du brun rougeâtre au jaune brunâtre (Figure 1.14.).

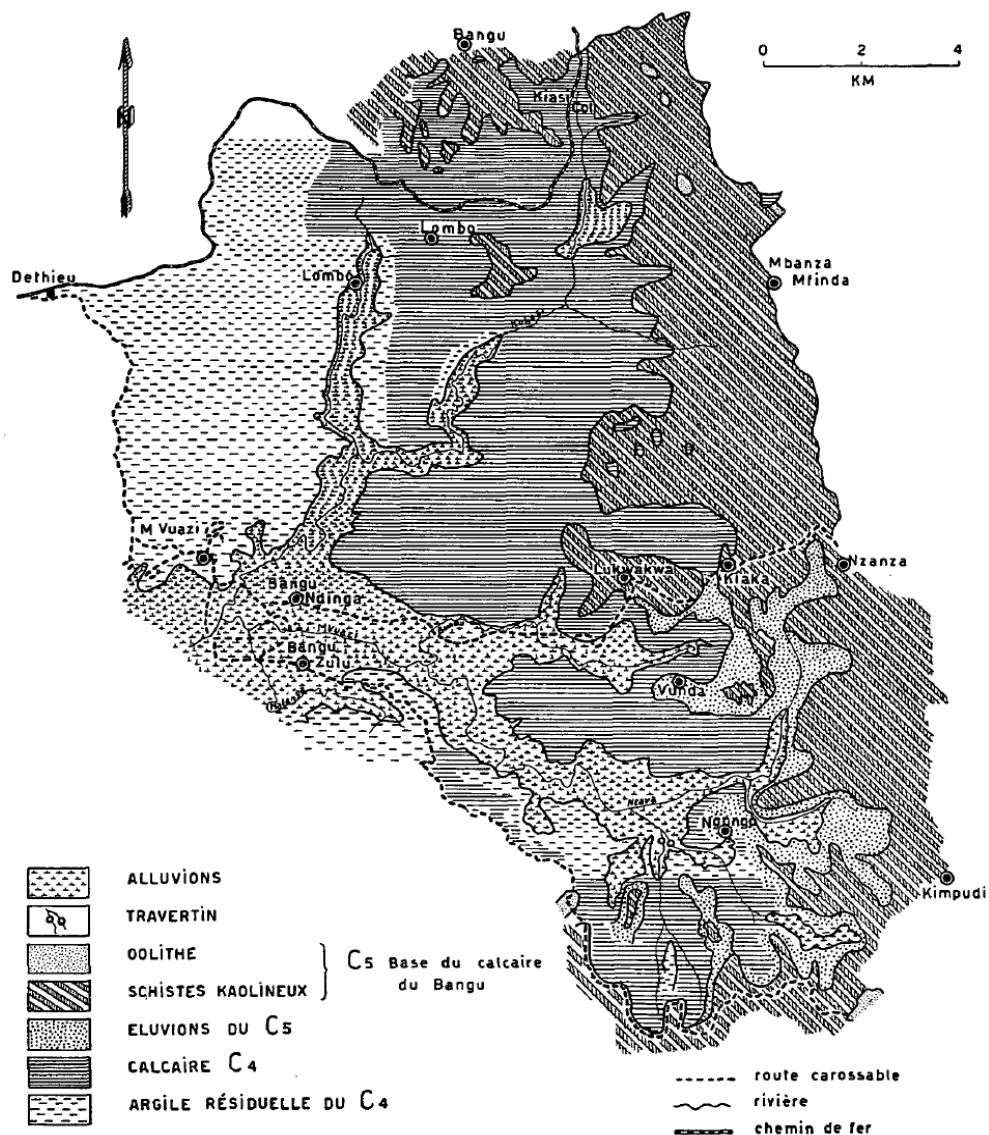


Figure 1.14. : Carte pédologique de la contrée de Mvuazi (Kongo Central) (Source : Denisoff et Devred, 1954)

La valeur agricole des sols alluvionnaires de Mvuazi est la meilleur de la région, tant par sa richesse que par sa résistance à l'érosion ou ses caractéristiques physiques associées à un relief aplani. On leur reproche néanmoins la superficialité de la nappe phréatique et le risque d'inondation (Denisoff et Devred, 1954).

### 1.3.3.2. La végétation

La contrée de Mvuazi est principalement constituée de savanes guinéennes ou soudano-zambéziennes, entrecoupées de galeries forestières décidues, ou de massifs forestiers isolés dans les climats Aw<sub>2-4</sub> (figure 1.15) (FAO/PNE, 1998). Les différents types de végétation que l'ont retrouve sont :

- des végétations aquatique et paludicole (les groupements de *Pistia stratiotes* et *Lemma paucicostata* (Lebrun, 1947) ainsi que l'association de *Nymphaea lotus* et *Utricularia thonningii* (Lebrun, 1947)),
- des végétations semi-aquatique et marécageuse (avec un groupement de roselière appelé la papyraie à *Cyperus papyrus* des marais permanents),
- des végétations nitrophile (avec un groupement à *Imperata cylindrica* et une association à *Panicum maximum* et *Leonotis nepetaefolia* (Léonard, 1950)) et postculturale, (avec une association à *Pennisetum purpureum*. Les espèces fondamentales qui constituent cette association est le *Pennisetum purpureum* K. SCHUM., connue localement sous le nom de « Madiadia », *Phaseolus lunatus* L., *Dioscorea bulbifera* LINN, *Glycine javanica* L., *Mucuna pruriens* var. *utilis* (WALL. ex WIGHT.) BACKER, *Entadopsis abyssinica* (STEUD.). Et une autre association à *Hyparrhenia confinis* avec comme espèce fondamentale l'*Hyparrhenia confinis* (HOCHST.) ANDERS, *Hyparrhenia wetwitschii* (RENDLE.) STAPF, etc.),
- des végétations des savanes herbeuses (des savanes mésophiles de l'alliance de l'*Hyparrhenion diplandrea* avec l'association à *Andropogon gabonensis* et *Nephrolepis cordifolia*, comprenant les espèces fondamentales comme l'*Entadopsis abissinica* (STEUD.) GILBERT et BOUTIQUE, *Cussonia angolensis* HIERN et *Peucedanum fraxinifolium* HIERN, *Andropogon gabonensis* STAPF ; l'association à *Hyparrhenia diplandra* et *Afromomum stipulatum* comprenant les espèces comme *Hyparrhenia diplandra* (HOCHST.) STAPF, *Tephrosia elegans* SCHUM., *Indigofera simplicifolia* LAM. ; l'association à *Loudetia arundinacea* et *Landolphia lanceolata* avec des jachères graminéennes à *Hyparrhenia confiniis* (HOCHST) ANDERS, la strate herbacée constituée par *Loudetia arundinacea* STEUD, *Panicum phragmitoides* STAPF, *Hymenocardia acida* TUL., etc.),
- des végétations des savanes arbustives (avec le groupement à *Crossopteryx febrifuga* comprenant les espèces comme *Gardenia javis-tonantis* HIERN, *Hymenocardia acida* TUL. ; le groupement à *Hymenocardia acida* TUL., etc.),

- des jachères forestières (avec les associations à *Harungana madagascariensis*, à *Trema guineensis*, à *Musanga cecropoides* et à *Hymenocardia ulmoides* et *Caloncoba wetwitschii*),
- une végétation arbustive ripicole (avec les associations à *Mimosa pigra* et *Honckenya ficifolia*, à *Alchornetum cordifoliae* avec comme espèce ripicole l'*Alchornea cordifolia* (SCHUM. et THONN.), *Pennisetum purpureum* K. SCHUM., etc.) et forestières (Denisoff et Devred, 1954).

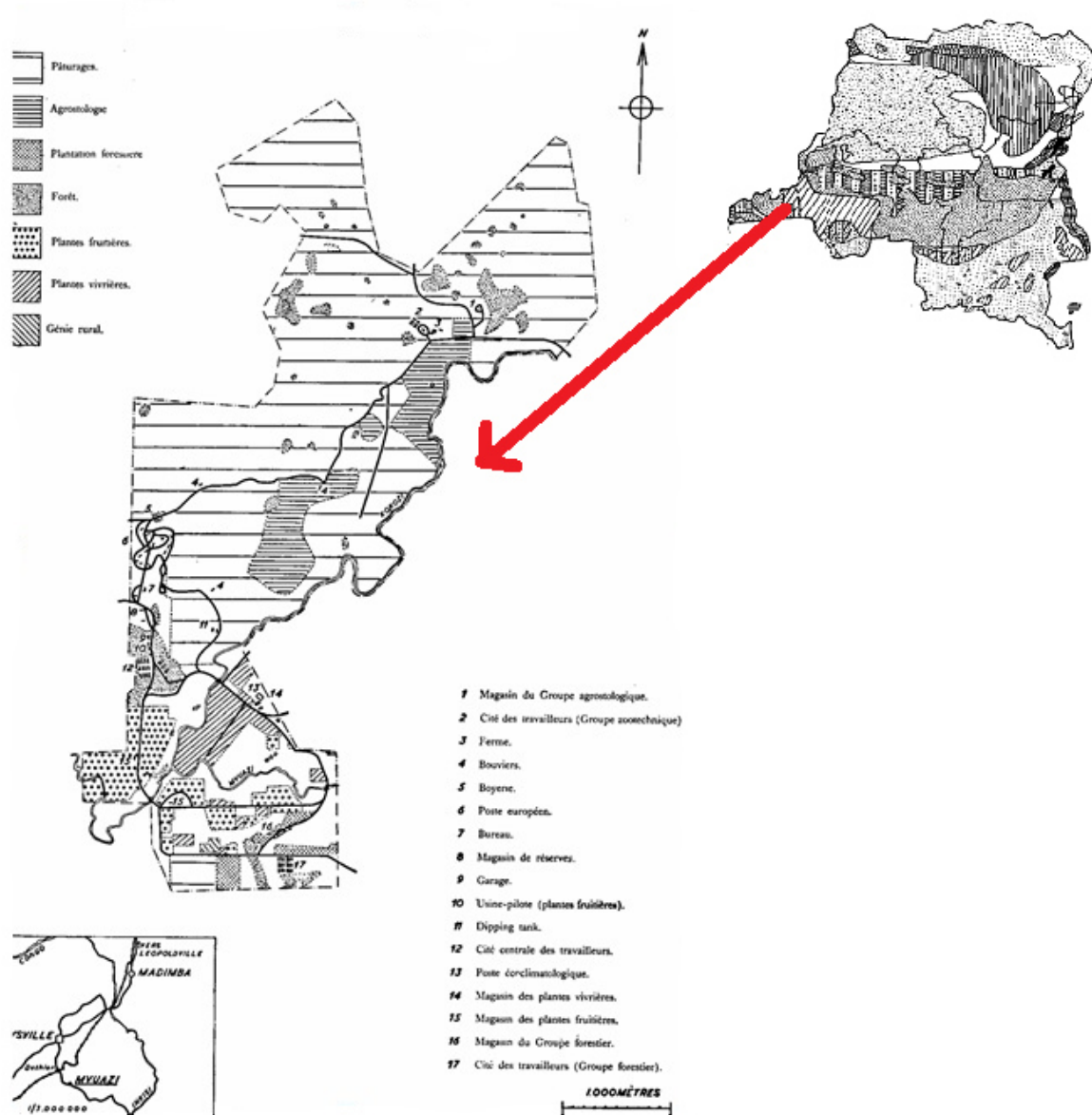


Figure 1.15 : Végétation du Centre de Recherche de Mvuazi et ses environs (Source: Denisoff et Devred, 1954 ; PRAGMA, 1987)

## **Chapitre 2 : Evaluation de l'association et de la rotation du maïs avec légumineuses vivrières, en semis direct dans la savanne du sud-ouest de la République Démocratique du Congo, « cas de Mvuazi »**

### **2.1. Introduction**

La culture d'association est un type de culture mixte et définie comme une pratique agricole consistant à cultiver deux ou plusieurs cultures dans le même espace au même moment. L'augmentation de la productivité par unité de surface peut constituer une raison importante pour cultiver deux ou plusieurs cultures ensemble (Hamd Alla *et al.*, 2014). Cela peut être vue aussi comme la mise en application des pratiques de diversification, de concurrence et de facilitation des espèces dans les systèmes de culture (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2006). L'association céréales-légumineuses joue un rôle important dans la production alimentaire mondiale et est communément pratiquée parce qu'il a divers avantages tels que une meilleure stabilité de rendement (Ofori et Stern, 1987, Mandal *et al.*, 2014), lorsqu'une récolte échoue, l'autre peut tout de même donner un rendement raisonnable (Steiner, 1982), une occupation efficace de terre plus élevée, une habilité de compétition envers la mauvaises herbes élevée, l'amélioration de la fertilité du sol due à la fixation de l'azote atmosphérique et quelques substances essentielles de certaines espèces de légumineuses (Sanginga et Woomer, 2009; Trenbath, 1976 ; Willey *et al.*, 1983, Mandal *et al.*, 2014).

En République Démocratique du Congo, en général, et dans sa zone agro-écologique du Sud-ouest en particulier (Province du Kongo Central), la production de résidus des légumineuses reste faible suite à l'exportation de la matière organique hors du champ et par la pratique d'incinération de déchets. Or, selon Roose (1984) les recherches qui avaient été effectuées depuis plus de 40 ans (Beirnaert, 1941, Jurion et Henry, 1967) avaient montré les causes et les facteurs de la dégradation physique et chimique des terres neuves; leurs conclusions avaient suggéré un certain nombre de méthodes capables, localement, de retarder cette dégradation, de limiter les pertes, voire de restaurer un potentiel de fertilité acceptable. Dans le système de culture actuel, un système de rotation de cultures avec une intégration des plantes de couverture a aussi été proposé en plus de l'association de cultures, afin de résoudre les problèmes d'épuisement de terre de culture (Ilnicki et Enache, 1992 ; Machet *et al.*, 1997). Les études menées à travers le monde ont montré que le système de semis direct sous couvert végétal mort

ou vif (SCV) assure une bonne productivité des surfaces cultivées et donne beaucoup d'avantages dans la gestion du sol (Capillon et Séguy, 2002 ; CIALCA, 2008, Mucheru-Muna *et al.*, 2010). Pour être performants, ces systèmes de cultures doivent produire une forte biomasse, en particulier les premières années d'entrée en semis direct.

Certes, les effets d'un paillis sur le sol sont bien connus (Gilley *et al.*, 1987 ; Alberts et Neibling, 1994), mais avec d'aussi faibles protections, on peut se demander quel est l'impact réel de cette technique sur le rendement du maïs pluvial et sur l'évolution de la fertilité à long terme de nos champs. Les informations sur les associations et les rotations des différentes variétés de maïs et légumineuses alimentaires sont très pauvres et ne permettent pas de se renseigner suffisamment sur ces cultures.

Cette étude vise l'acquisition des connaissances sur la réponse de la culture du maïs en association et en rotation avec les légumineuses alimentaires utilisées comme plantes de couverture, dans le but de déterminer le type de couvert à utiliser en vue de mieux valoriser leurs effets sur le rendement du maïs.

## **2.2. Matériels et méthode**

### **2.2.1. Matériels**

L'essai a été conduit au Centre de Recherche de l'INERA/Mvuazi, situé dans la province du Kongo-Central à 207 Km au Sud-Ouest de Kinshasa, durant deux saisons culturales (2011 et 2012). Les caractéristiques édapho-climatiques de l'INERA/Mvuazi correspondent à celles de la zone tropicale à climat chaud et humide de type Aw<sub>4</sub> selon la classification de Köppen (1936). Dans cette étude, les échantillons de sol ont été collectés et ont été analysés pour déterminer la teneur en N, P, K et le pH. Ces analyses ont été effectuées au laboratoire de Crop Nutrition Laboratory Services en date du 20 juillet 2011.

L'essai a été exécuté sur un terrain non labouré et débarrassé de tout résidu couvrant le sol, par le semis de huit différentes variétés de maïs, à cycle végétatif variant entre 90-110 jours, dont deux variétés biofortifiées à haute teneur en protéine de qualité (QPM variétés Mudishi 1 et Mudishi 3) et six variétés ordinaire (Samaru, 07 SADVE, 08 SADVE 1, 09 SADVE-F<sub>2</sub>, ZM 523 et VP O538) ; ainsi que deux espèces de légumineuses à cycle végétatif précoce (< 100 jours) dont le soja (variété Vuangi) et le niébé (variété H4) (Tableau 2.1.). Les semences ont été fournies par l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques (INERA/Mvuazi).

**Tableau 2.1. : Caractéristiques des variétés de maïs et de légumineuses (niébé et soja)**

Variétés	Origine	Obtenteur	Cycle végétatif (jours)	Type variétal	Rendement en Station (/hectare)	Zone de diffusion	Sources
<b>1. Maïs</b>							
Samaru	IITA/ Nigéria	INERA	90	Composite	3,0 T	Kongo Central, Kinshasa et Bandundu	INERA- MVUAZI, 2006
Mudishi 1	NARO/ Ouganda	INERA	110	OPV	5 T	les 2 Kasai, Nord Katanga, Bas Congo, Bandundu,	Mbuya, 2013 ; Mbuya <i>et al.</i> , 2010
Mudishi 3	IITA/ IBADAN	INERA	100	OPV	3 – 4 T	les 2 Kasai, Nord Katanga, Bas Congo, Bandundu, Province Orientale, Equateur	Mbuya, 2013 ; Mbuya <i>et al.</i> , 2010
07 SADVE	CIMMYT /ZIM	INERA	100	OPV	3 – 4 T	-	INERA, 2013 ; Magorokosho <i>et al.</i> , 2009
08 SADVE 1	CIMMYT /ZIM	INERA	110	OPV	3 – 5 T	-	INERA, 2013 ; Magorokosho <i>et al.</i> , 2009
09 SADVE F2	CIMMYT /ZIM	INERA	110	OPV	4 – 5 T	-	INERA, 2013 ; Magorokosho <i>et al.</i> , 2009
ZM 523	CIMMYT /ZIM	INERA	100	OPV	3 T	-	INERA, 2013 ; Magorokosho <i>et al.</i> , 2009
VPO 538	CIMMYT /ZIM	INERA	100	OPV	3 – 4 T	-	INERA, 2013 ; Magorokosho <i>et al.</i> , 2009
<b>2. Légumineuses</b>							
H4 (Niébé)	Congo	INERA	80	-	0,8 – 1,5 T	Kongo Kinshasa Bandundu	Central, et 2006
VUANGI (Soja)	IITA/ Nigéria	INERA	95	-	2 – 2,5 T	Kongo Kinshasa Bandundu	Central, et 2006



## 2.2.2. Méthode

### 2.2.2.1. Dispositif expérimental

Suivant un dispositif factoriel en split plot, les traitements ont été répétés quatre fois et ont consisté en des systèmes en monoculture, en association et en rotation. Les variétés de maïs ont été semées, aux écartements de 1m x 0,25m, en culture pure et en association, pour une densité de 4 plantes par m<sup>2</sup>, suivant le modèle de Paliwal *et al.* (2002), dans des parcelles de 6m x 4m. Les variétés de niébé et de soja ont été semées un jour après le maïs, aux écartements de 0,33m x 0,05m en culture pure et en association, pour une densité de 60 plantes par m<sup>2</sup>. La culture pure pour chaque espèce utilisée a été utilisée comme traitement témoin (figure 2.1.).

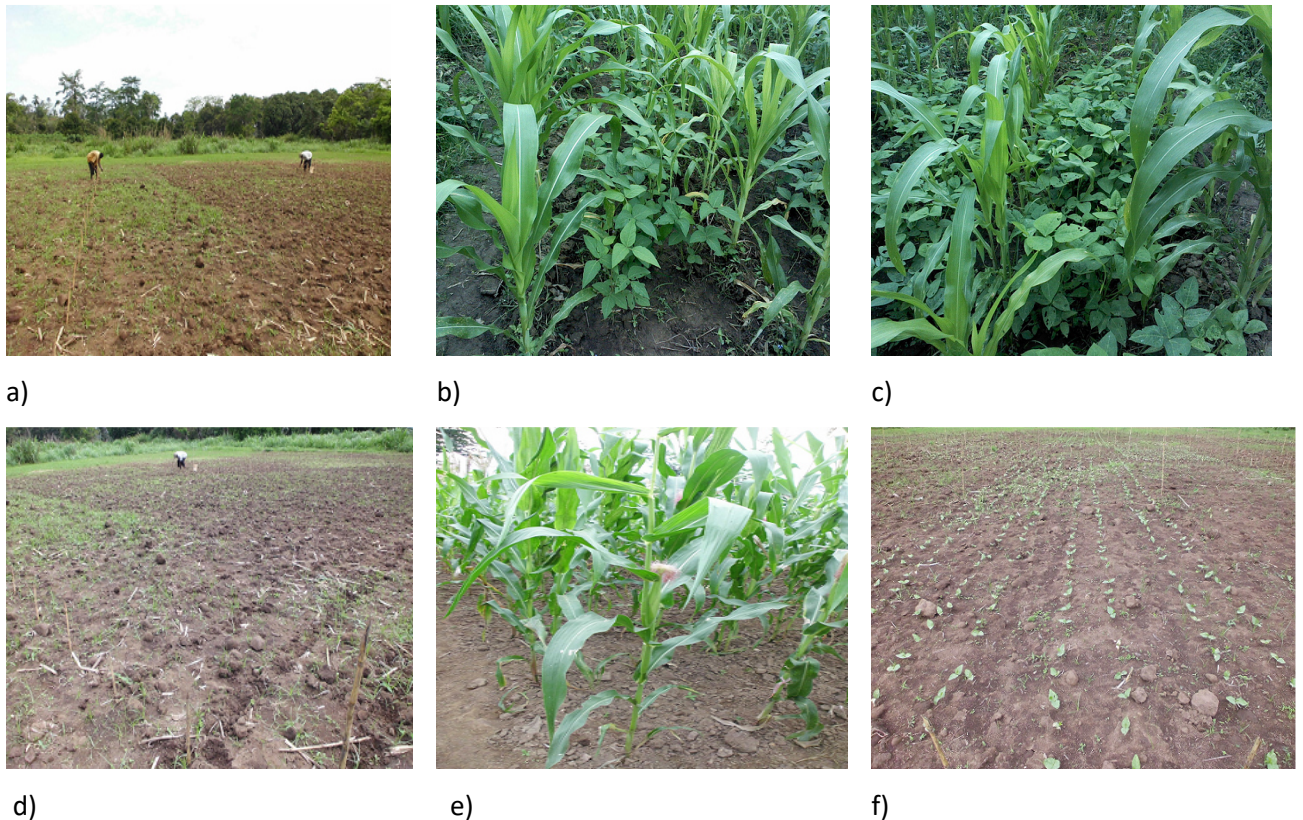


Figure 2.1. : a) Semis des parcelles de légumineuses en intercalaire avec le maïs ; b) parcelle de culture intercalaire maïs-soja ; c) parcelle de culture intercalaire maïs-niébé ; d) Semis des parcelles de maïs et légumineuses en monoculture ; e) parcelle de monoculture de maïs ; f) parcelle de monoculture de légumineuse (niébé).

A la fin de la saison A (mi octobre à mi février), toutes les parcelles ont été fauchées et les résidus laissés sur place pour servir de paillis : paille de chaume de maïs, paille de maïs + niébé et paille de maïs + soja. En saison B (mi mars à mi juin), le maïs a été semé sur paillis d'une

épaisseur de 5cm (Van Asten *et al.*, 2007), sur un terrain non labouré. Dans cette phase, l'essai a été installé dans les mêmes parcelles avec, comme témoin, des parcelles de même dimensions non cultivées, couvertes de paillis d'adventices (Figure 2.2.).

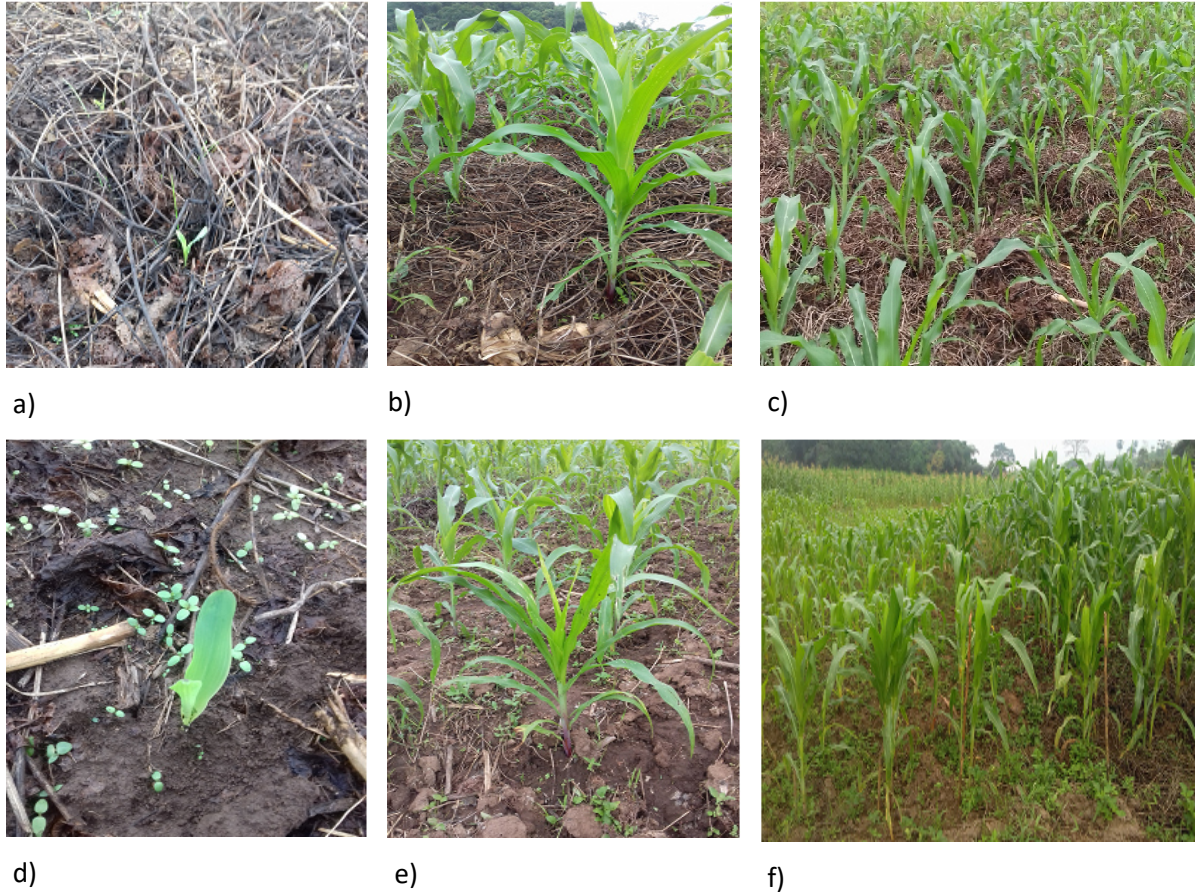


Figure 2.2. : a) Semis de maïs sur paillis des légumineuses ; b) maïs sur paillis de niébé ; c) maïs sur paillis de soja ; d) semis de maïs sur paillis de maïs ; e) parcelle de monoculture de maïs sur paillis de maïs ; f) croissance des variétés de maïs semés sur paillis de maïs (à gauche) et sur paillis de niébé (à droite).

#### 2.2.2.2. Collecte des données

Les paramètres observés pour cette expérimentation sont :

- le rendement en grain pour le maïs et en graines pour les légumineuses,

$$\text{Pour le maïs, Rendement} = \frac{PC}{1000} \times \frac{(100-HR)}{(100-HA)} \times Ri \times \frac{10000}{(SU \times 1000)} \quad (\text{Eq 2.1})$$

$$\text{Pour le soja et le niébé, Rendement} = \frac{PC \times 10000}{(SU \times 1000)} \quad (\text{Eq 2.2})$$

- le nombre de plants par parcelle utile,
- la biomasse d'épis vendable,
- la biomasse d'épis non vendable,
- la biomasse en graines comestibles,
- la biomasse en graines non comestibles, la biomasse des gousses vides pour les deux espèces de légumineuses étudiées.

Tous ces paramètres ont été observés à la maturité des variétés de maïs et des légumineuses.

### **2.2.2.3. Analyse économique**

L'évaluation de la rentabilité des systèmes de culture testés dans la production du maïs et des légumineuses en monoculture et SCV a été basée sur une simple analyse économique. Pour y parvenir, le bénéfice net a été calculé pour chaque traitement en utilisant la formule :

$$\text{Bénéfice} = P - C_{vt} \quad (\text{Eq. 2.3.})$$

Où :

- $P$  = Production après la vente sur le marché. Il est calculé comme suit :  
 $CP = (\text{Rdt} \times p)$  (Eq. 2.4.)  
 Avec Rdt = le rendement total en grains du maïs ou des légumineuses (kg/ha) et  $p$  = le prix de vente sur le marché local (0.67 \$USD/kg pour le maïs grain, 1 \$USD /kg pour le niébé et le soja grain) ;
- $C_{vt}$  = le coût variable total de tous les intrants impliqués dans l'expérimentation. Cela implique aussi tous les coûts liés à la production (préparation de terrain, travaux d'installation et d'entretien, récolte).

Le tarif généralement utilisé dans le site d'étude pour le temps de travail effectué est de 1.67 \$USD pour une journée de travail. La productivité du travail (ratio  $P/C_{vt}$ ) a été déterminée en faisant le rapport entre le coût de production et le coût variable total.

#### 2.2.2.4. Analyses des données

Les données ont été soumises à l'analyse de la variance suivant le modèle général linéaire (Anova Model<-aov (y~traitement). La séparation des moyennes en groupes homogènes a été faite par le test de LSD (5%). Le logiciel R 3.1.3 (2015) a servi d'outil pour analyser ces données.

### 2.3. Résultats

#### 2.3.1. Information sur les conditions du sol

Les analyses de sol du site d'expérimentation qui ont été effectuées au laboratoire de Crop Nutrition Laboratory Services en date du 20 juillet 2011 ont donné les résultats dans le tableau 2.2. Les valeurs approximatives obtenues après analyse du sol montrent que le pH, le phosphore, le potassium, le limon et certains éléments traces sont en dessous du seuil de tolérance le plus bas pour la culture du maïs ; tandis que l'azote et le magnésium présente des valeurs qui sont au dessus du seuil de tolérance.

Tableau 2.2. : Paramètres physique et chimique sélectionnés pour les analyses de sol du site d'expérimentation INERA/Mvuazi.

Paramètres (unité)	Résultats	Guide bas	Guide élevé
pH du Sol	5,76	6,00	7,00
P1 (ppm)	14	30	100
K (ppm)	105	268	537
Ca (ppm)	1505	1651	2064
Mg (ppm)	229	165	264
Mn (ppm)	55	100	250
S (ppm)	23	20	200
Cu (ppm)	12,3	2,00	10,00
B (ppm)	0,21	1,00	2,00
Zn (ppm)	7,98	4,00	20,00
Na (ppm)	47	0	158
Fe (ppm)	194	150	350
CEC (meq/100g)	13,76	15,00	30,00
OC (meq/100g)	4,07		
Limon (%)	13	30	50
Sable (%)	49	30	55
Argile (%)	39	20	55
N (%)	0,21	0,20	0,50

### 2.3.2. Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants, la biomasse et le rendement du maïs en première saison.

L'analyse de la variance des moyennes du nombre de plants par parcelle a révélé des différences significatives ( $p < 0,05$ ) entre traitements et les variétés (tableau 2.3). Le nombre de plants de maïs a varié de 56,21 pour la monoculture à 38,6 pour l'association avec le niébé. Les monocultures de Mudishi 1, Mudishi-3 et Samaru se sont révélées plus performantes avec plus de 60 plants par parcelle utile.

Quant à la biomasse en épis vendables, la différence a été significative ( $p < 0,05$ ) entre traitements, mais hautement significative entre variétés ( $p < 0,001$ ), on a observé une particularité pour la variété Mudishi-3 qui a produit plus de 73% de biomasse d'épis vendables dans tous les traitements. Pour la biomasse en épis non vendables, la différence n'était pas significative entre traitements. Les pertes ont été observées plus en monoculture qu'en association des cultures (Tableau 2.3).

**Tableau 2.3. : Effets des associations et des monocultures sur les différentes variétés de maïs pour les nombre de plants, biomasse des épis vendables, biomasse des épis non vendables et rendement en grains à la première saison.**

Variétés	Traitements	Nombre de plants/parcelle	Biomasse des épis vendables (%)	Biomasse des épis non vendables (%)	Rendement en grains (kg/ha)
07 SADVE	Monoculture	56,00 ab	68,22 a	68,72 b	2665,86 a
08 SADVE 1	Monoculture	41,75 b	68,51 a	68,54 b	2129,52 a
09 SADVE F2	Monoculture	54,75 ab	67,12 ab	69,91 b	2128,00 a
Mudishi 1	Monoculture	61,00, a	70,20 a	69,32 b	2402,40 a
Mudishi 3	Monoculture	61,50 a	74,77 a	76,51 a	2283,62 a
Samaru	Monoculture	61,50 a	72,81 a	72,26 ab	2849,44 a
VPO 538	Monoculture	54,50 ab	68,68 a	73,44 ab	2277,22 a
ZM 523	Monoculture	58,75 a	67,88 a	72,30 ab	2065,53 a
<b>Moyenne</b>		<b>56,22</b>	<b>69,77</b>	<b>71,38</b>	<b>2350,20</b>
07 SADVE	Mixte + niébé	46,25 a	70,57 a	70,53 ab	1999,73 a
08 SADVE 1	Mixte + niébé	33,75 b	68,56 b	62,47 b	1298,92 b
09 SADVE F2	Mixte + niébé	35,5 ab	68,25 b	69,3 ab	965,13 b
Mudishi 1	Mixte + niébé	34,75 ab	70,63 a	70,9 ab	753,60 b
Mudishi 3	Mixte + niébé	46,25 a	73,87 a	75,98 a	1351,04 b
Samaru	Mixte + niébé	46,00 a	74,13 a	74,52 a	2028,88 a
VP O538	Mixte + niébé	31,50 b	73,31 a	71,67 ab	1133,73 b
ZM 523	Mixte + niébé	35,25 ab	70,10 a	68,84 ab	1212,45 b
<b>Moyenne</b>		<b>38,66</b>	<b>71,18</b>	<b>70,53</b>	<b>1342,94</b>
07 SADVE	Mixte + soja	52,50 a	69,33 ab	69,44 a	2206,49 a
08 SADVE 1	Mixte + soja	41,50 c	68,20 b	63,70 a	2040,76 a
09 SADVE F2	Mixte + soja	45,50 b	68,97 b	70,00 a	1843,63 a
Mudishi 1	Mixte + soja	47,00 b	70,64 ab	72,51 a	2113,15 a
Mudishi 3	Mixte + soja	52,25 a	75,05 a	75,92 a	2291,12 a
Samaru	Mixte + soja	47,50 b	71,94 ab	69,13 a	2113,9 a
VPO 538	Mixte + soja	44,00 bc	72,64 a	73,63 a	1984,68 a
ZM 523	Mixte + soja	40,00 c	70,57 ab	72,84 a	2062,06 a
<b>Moyenne</b>		<b>46,28</b>	<b>70,92</b>	<b>70,90</b>	<b>2081,97</b>
Effet variétés		0,01605*	3,56 <sup>e-11</sup> ***	2,194 <sup>e-06</sup> ***	0,4757
Effet traitements		1,996 <sup>e-08</sup> ***	0,02226*	0,7206	9,842 <sup>e-05</sup> ***
Effet variétés x traitements		0,8762	0,4624	0,6274	0,9962

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0,001 = '***'$  ;  $0,001 < \alpha < 0,01 = '**'$  ;  $0,01 < \alpha < 0,05 = '*'$  ;  $0,05 < \alpha < 0,1 = '†'$  ;  $0,1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .

Concernant le rendement en grain, une différence hautement significative a été observée ( $p < 0,001$ ) entre les traitements (Tableau 2.3). Le rendement moyen en grains en monoculture a été plus importante (2350,2 kg/ha), comparée aux associations des cultures : 1342,9 kg/ha pour le niébé et 2081,9 kg/ha pour le soja. Par conséquent, le meilleur rendement a été enregistré en monoculture de Samaru avec 2849,44kg/ha.

### **2.3.3. Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants, la biomasse et le rendement en graines des légumineuses en première saison.**

Les analyses des variances portées sur les moyennes des données de rendement en graines des légumineuses ont montré des différences très significative ( $p < 0,01$ ) entre les variétés et les interactions, et des différences hautement significative ( $p < 0,001$ ) entre les traitements (Tableau 2.4.). La moyenne de rendement en graines du soja en monoculture s'est révélée supérieure (1802,23 kg/ha) à celle observée en association avec le maïs (809,31kg/ha) en général, avec l'association 08SADVE1-soja (932,37 kg/ha) en particulier. Cependant, la monoculture de niébé a produit moins (17,82 kg/ha) par rapport à l'association avec le maïs (48,39 kg/ha), bien que le rendement en graines le plus élevé ait été obtenu dans l'association Samaru-niébé (96,14 kg/ha).

Quant à la biomasse, des différences hautement significatives ( $p < 0,001$ ) ont été observées entre traitement pour les gousses vides et les graines comestibles (Tableau 2.4.). La monoculture de niébé a donné 5,5% contre 4,41% en association pour les graines comestibles. La monoculture de soja a donné 47,44% de biomasse de graines comestibles, comparée à l'association avec 46,13%. L'analyse des moyennes du nombre de plants et biomasse des grains non comestibles n'ont révélé aucune différence entre traitements, variétés et interactions (Tableau 2.4.).

**Tableau 2.4.: Effet de l'association des cultures sur le nombre de plants par parcelle, de la biomasse des graines, de la biomasse des gousses vides et du rendement en graines des légumineuses à la première saison.**

Variétés	Traitements	Nombre de plants/parcelle	Biomasse des graines comestibles (%)	Biomasse des graines non comestibles (%)	Biomasse des gousses vides (%)	Rendement en graines (kg/ha)
Monoculture	Niébé	632,75	5,50 b	11,88	24,69 a	17,82 d
07 SADVE	Mixte + niébé	525,75	12,68 b	4,75	18,22 b	76 cd
08 SADVE 1	Mixte + niébé	555,00	3,13 b	9,15	30,76 a	15,78 d
09 SADVE F2	Mixte + niébé	583,75	2,09 b	6,06	15,85 b	39,67 d
Mudishi 1	Mixte + niébé	541,50	3,09 b	7,003	16,51 b	38,29 d
Mudishi 3	Mixte + niébé	577,75	0,84 b	7,84	17,54 b	19,78 d
Samaru	Mixte + niébé	493,75	4,09 b	5,52	17,51 b	96,14 cd
VPO 538	Mixte + niébé	489,00	5,49 b	4,64	18,34 b	33,28 d
ZM 523	Mixte + niébé	545,00	3,88 b	5,07	16,44 b	68,2 cd
<b>Moyenne</b>		<b>538,94</b>	<b>4,41</b>	<b>6,25</b>	<b>18,90</b>	<b>48,39</b>
Monoculture	Soja	554,25	47,44 a	5,03	26,80 a	1802,23 a
07 SADVE	Mixte + soja	468,5	46,99 a	6,62	30,04 a	546,92 bcd
08 SADVE 1	Mixte + soja	535,25	49,37 a	5,12	27,41 a	932,37 b
09 SADVE F2	Mixte + soja	557,5	49,02 a	4,32	28,8 a	885,49 b
Mudishi 1	Mixte + soja	489,25	45,85 a	6,38	27,17 a	859,44 b
Mudishi 3	Mixte + soja	617,75	44,92 a	9,11	28,19 a	817,77 b
Samaru	Mixte + soja	450	41,85 a	10,53	28,28 a	718,81 bc
VPO 538	Mixte + soja	497,5	45,62 a	5,74	29,64 a	838,61 b
ZM 523	Mixte + soja	579,75	45,48 a	6,52	30,34 a	875,07 b
<b>Moyenne</b>		<b>524,44</b>	<b>46,14</b>	<b>6,79</b>	<b>25,21</b>	<b>808,44</b>
Effet variétés		0,2541	0,4973	0,8859	0,819	0,0046**
Effet traitements		0,4217	<2 <sup>-16</sup> ***	0,8342	3,936 <sup>e-05</sup> ***	<2,2 <sup>e-16</sup> ***
Effet variétés x traitements		0,9731	0,5685	0,6336	0,521	0,0013**

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*'; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*'; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*'; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '†'; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = 'ns'.

### 2.3.4. Effet du paillis provenant de la rotation sur le rendement, le nombre de plants et des biomasses du maïs en deuxième saison.

L'analyse de la variance des moyennes des paramètres de nombre de plants, de biomasse et de rendement en grains du maïs sur paillis n'ont révélé aucune différence significative ( $p > 0,1$ ) entre les variétés, les traitements et les interactions (tableau 2.5). Les moyennes observées pour le nombre de plants ont varié entre 58,12 (paillis de maïs + niébé) et 60,09 (paillis de chaume de maïs), et pour la biomasse des épis vendables, celle-ci a varié entre 49,30 (paillis de maïs + niébé) et 50,77 (paillis de chaume de maïs). Ainsi, les moyennes de rendement du maïs étaient plus élevées sur le paillis de maïs+niébé (2974,83 kg/ha) suivit du paillis de maïs (2686,78kg/ha) et du paillis de maïs+soja (2624,50 kg/ha).

**Tableau 2.5: Effets des types de paillis et des monocultures sur les différentes variétés de maïs pour les paramètres de nombre de plants, biomasse des épis vendables, biomasse des épis non vendables et rendement en grains à la deuxième saison.**

Variétés	Traitements	Nombre de plants/parcelle	Biomasse des épis vendables (%)	Biomasse des épis non vendables (%)	Rendement en grains (kg/ha)
07 SADVE	Chaume de maïs	60,75	49,81	47,41	2658,50
08 SADVE 1	Chaume de maïs	64,75	50,07	55,74	2905,80
09 SADVE F2	Chaume de maïs	57,75	57,03	48,23	2586,80
Mudishi 1	Chaume de maïs	53,00	50,84	43,17	2467,00
Mudishi 3	Chaume de maïs	62,50	47,99	48,11	3474,60
Samaru	Chaume de maïs	59,25	54,67	50,05	2689,00
VPO 538	Chaume de maïs	61,25	48,55	61,70	2222,40
ZM 523	Chaume de maïs	61,50	47,26	47,44	2490,10
<b>Moyenne</b>		<b>60,09</b>	<b>50,78</b>	<b>50,23</b>	<b>2686,78</b>
07 SADVE	Maïs + niébé	63,50	48,90	52,44	3662,80
08 SADVE 1	Maïs + niébé	55,00	47,74	47,87	2494,40
09 SADVE F2	Maïs + niébé	60,75	43,39	48,35	3034,10
Mudishi 1	Maïs + niébé	61,50	49,85	50,41	2682,40
Mudishi 3	Maïs + niébé	56,75	52,32	52,86	2897,80
Samaru	Maïs + niébé	55,25	55,63	53,56	3120,20
VPO 538	Maïs + niébé	56,25	45,68	47,02	2847,30
ZM 523	Maïs + niébé	56,00	50,93	50,45	3059,60
<b>Moyenne</b>		<b>58,13</b>	<b>49,30</b>	<b>50,37</b>	<b>2974,83</b>
07 SADVE	Maïs + soja	60	47,54	48,54	2729,20
08 SADVE 1	Maïs + soja	60,5	49,55	47,29	2548,40
09 SADVE F2	Maïs + soja	67,5	55,46	49,27	3503,40
Mudishi 1	Maïs + soja	58	53,02	48,45	2604,80
Mudishi 3	Maïs + soja	56,25	53,79	46,21	2435,30
Samaru	Maïs + soja	55,75	49,44	54,22	2503,10
VPO 538	Maïs + soja	57,25	51,9	42,42	2430,30
ZM 523	Maïs + soja	54	44,18	49,95	2241,50
<b>Moyenne</b>		<b>58,66</b>	<b>50,61</b>	<b>48,29</b>	<b>2624,5</b>
Effet variétés		0,7018	0,4566	0,9333	0,7053
Effet traitements		0,6284	0,6554	0,8318	0,2600
Effet variétés x traitements		0,6519	0,3442	0,3797	0,7952

Seuils de probabilité : 0 <math>\alpha</math><0.001='\*\*\*'; 0.001<math>\alpha</math><0.01='\*\*'; 0.01<math>\alpha</math><0.05='\*'; 0.05<math>\alpha</math><0.1='†'; 0.1<math>\alpha</math><1=' ns '.

### 2.3.5. Variation du rendement de maïs en association et en rotation

L'analyse de la variance portée sur la moyenne de variation du rendement en grains du maïs en association et sur paillis a révélé des différences hautement significatives entre les variétés, les traitements et les interactions ( $p<0,001$ ) (tableau 2.6). Ces variations sont de l'ordre de 14,32% sur le paillis de maïs en monoculture, 121,52% sur paillis de maïs + niébé et 26,06% sur paillis de maïs + soja. Le maïs semé sur paillis de maïs + niébé a soit doublé, triplé ou quadruplé son rendement en grains, en comparaison à ceux obtenus en association au cours de la première saison. Ces fortes variations seraient dues à l'amélioration de la fertilité du sol par l'effet de rotation de culture qui a permis une meilleure croissance et vigueur des plants de maïs (figure 2.3.).





a)

b)

c)

*Figure 2.3. : Parcelles des variétés de maïs semés a) sur paillis de maïs ; b) sur paillis de maïs+niébé et c) sur paillis de maïs+soja.*

**Tableau 2.6: Effets des traitements d'associations des cultures et de rotation sur le rendement en grains des variétés de maïs en première et en deuxième saisons**

Variétés	Traitements	Rendement (kg/ha)		
		Saison 1	Saison 2	Accroissement (%)
07 SADVE	Monoculture	2665,86 a	2658,50	-0,28d
08 SADVE 1	Monoculture	2129,52 a	2905,80	36,45b
09 SADVE F2	Monoculture	2128,00 a	2586,80	21,56b
Mudishi 1	Monoculture	2402,40 a	2467,00	2,69c
Mudishi 3	Monoculture	2283,62 a	3474,60	52,15a
Samaru	Monoculture	2849,44 a	2689,00	-5,63d
VPO 538	Monoculture	2277,22 a	2222,40	-2,41d
ZM 523	Monoculture	2065,53 a	2490,10	20,56b
<b>Moyenne</b>		<b>2350,20</b>	<b>2686,78</b>	<b>336,58</b>
07 SADVE	Mixte + niébé	1999,73 a	3662,80	83,16c
08 SADVE 1	Mixte + niébé	1298,92 b	2494,40	92,04c
09 SADVE F2	Mixte + niébé	965,13 b	3034,10	214,37a
Mudishi 1	Mixte + niébé	753,60 b	2682,40	255,94a
Mudishi 3	Mixte + niébé	1351,04 b	2897,80	114,49b
Samaru	Mixte + niébé	2028,88 a	3120,20	53,79d
VPO 538	Mixte + niébé	1133,73 b	2847,30	151,14b
ZM 523	Mixte + niébé	1212,45 b	3059,60	152,35b
<b>Moyenne</b>		<b>1342,94</b>	<b>2974,83</b>	<b>1631,89</b>
07 SADVE	Mixte + soja	2206,49 a	2729,20	23,69b
08 SADVE 1	Mixte + soja	2040,76 a	2548,40	24,88b
09 SADVE F2	Mixte + soja	1843,63 a	3503,40	90,03a
Mudishi 1	Mixte + soja	2113,15 a	2604,80	23,27b
Mudishi 3	Mixte + soja	2291,12 a	2435,30	6,29d
Samaru	Mixte + soja	2113,9 a	2503,10	18,41c
VPO 538	Mixte + soja	1984,68 a	2430,30	22,45b
ZM 523	Mixte + soja	2062,06 a	2241,50	8,70d
<b>Moyenne</b>		<b>2081,97</b>	<b>2624,5</b>	<b>542,53</b>
Effet variétés		0,4757	0,7053	0,4937
Effet traitements		9,842 <sup>e-05***</sup>	0,2600	1,55 <sup>e-06***</sup>
Effet variétés x traitements		0,9962	0,7952	0,7580

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*' ; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*' ; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*' ; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '†' ; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = ' ns '.

### 2.3.6. Analyse économique des variétés de maïs en système d'association et de rotation sur paillis de légumineuses

L'analyse des paramètres de production, bénéfice et rapport production/coût des variables totales de l'analyse économique des cultures en association a révélé des différences hautement significatives ( $p < 0,001$ ) entre les traitements (tableau 2.7). L'analyse économique des différentes cultures a indiqué des moyennes de gains définis pour les associations maïs-niébé (1083.01 \$USD) et maïs-soja (3536.93\$ USD), ainsi que des pertes pour les monocultures de maïs sauf pour les variétés 07SADVE et Samaru pour lesquelles nous avons observés des gains de l'ordre respectif de 120.4 \$USD et de 139.93 \$USD.

**Tableau 2.7 : Analyse économique des variétés de maïs en système d'association avec les légumineuses**

Variétés	Traitements	Production	Bénéfice	Rapport
		(\$USD)	(\$USD)	P/Cvt
07 SADVE	Mixte + niébé	3459.53ab	2223.66ab	2,8
08 SADVE 1	Mixte + niébé	2191.17bc	955.30bc	1,77
09 SADVE F2	Mixte + niébé	1674.65bc	438.79bc	1,36
Mudishi 1	Mixte + niébé	1319.82c	83.96c	1,07
Mudishi 3	Mixte + niébé	2284.71bc	1048.84bc	1,85
Samaru	Mixte + niébé	3541.70bc	2305.83ab	2,87
VPO 538	Mixte + niébé	1945.02bc	709.15bc	1,57
ZM 523	Mixte + niébé	2134.42bc	898.55bc	1,73
<b>Moyenne</b>		<b>2318,88</b>	<b>1083,01</b>	<b>1,88</b>
07 SADVE	Mixte + soja	4589.01a	3307.14a	3,58
08 SADVE 1	Mixte + soja	4955.21a	3673.34a	3,87
09 SADVE F2	Mixte + soja	4548.52a	3266.65a	3,55
Mudishi 1	Mixte + soja	4954.32a	3672.45a	3,86
Mudishi 3	Mixte + soja	5181.48a	3899.61a	4,04
Samaru	Mixte + soja	4721.18a	3439.31a	3,68
VPO 538	Mixte + soja	4705.47a	3423.60a	3,67
ZM 523	Mixte + soja	4895.21a	3613.35a	3,82
<b>Moyenne</b>		<b>4818,80</b>	<b>3536,93</b>	<b>3,76</b>
07 SADVE	Monoculture	1333.15c	120.48c	1,1
08 SADVE 1	Monoculture	865.94c	-346.72c	0,71
09 SADVE F2	Monoculture	643.41c	-569.25c	0,53
Mudishi 1	Monoculture	502.40c	-710.27c	0,41
Mudishi 3	Monoculture	900.69c	-311.97c	0,74
Samaru	Monoculture	1352.58c	139.92c	1,12
VPO 538	Monoculture	755.81c	-456.85c	0,62
ZM 523	Monoculture	808.30c	-404.37c	0,67
<b>Moyenne</b>		<b>895,29</b>	<b>-317,38</b>	<b>0,74</b>
Effet variétés		0,6241	0,6241	0,5963
Effet traitements		<2 <sup>e-16***</sup>	<2 <sup>e-16***</sup>	4,834 <sup>e-16</sup>
Effet variétés x traitements		0,9695	0,9695	0,9665

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*' ; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*' ; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*' ; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '†' ; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = 'ns'.

Sur les différents systèmes d'association, les bénéfices maximum qui étaient de 3899.6 \$USD (Mudishi3 – soja) et minimum étaient de 709.15 \$USD (VPO538 – niébé). Le meilleur rapport de la production/coût des variables totales de l'association Mudishi3 – soja (4,04) indique le faible coût d'investissement aux charges opérationnelles. Tandis que le plus grand déficit étaient de 710.26 \$USD a été observé en monoculture avec la variété Mudishi 1 (tableau 2.7.). Par contre, l'analyse de la variance des moyennes des paramètres de production, bénéfice et production/coût des variables totales de l'analyse économique des cultures sur paillis n'ont révélé aucune différence significative ( $p > 0,1$ ) entre variétés, traitements et interactions (tableau 2.8). Sur les différents systèmes de culture sur paillis, les bénéfices maximum qui étaient de

1227.89 \$USD (07SADVE – niébé) avec un rapport production/coût des variables totales de 2,01 et les bénéfices minimum étaient de 267.61 \$USD (VPO538 en monoculture).

**Tableau 2.8 : Analyse économique des variétés de maïs sur paillis de légumineuses**

Variétés	Traitements	Production	Bénéfice	Rapport
		(\$USD)	(\$USD)	P/Cvt
07 SADVE	Maïs + niébé	2441.89	1227.89	2,01
08 SADVE 1	Maïs + niébé	1662.90	448.90	1,37
09 SADVE F2	Maïs + niébé	2022.71	808.71	1,67
Mudishi 1	Maïs + niébé	1788.24	574.24	1,47
Mudishi 3	Maïs + niébé	1931.88	717.88	1,59
Samaru	Maïs + niébé	2080.11	866.11	1,71
VPO 538	Maïs + niébé	1898.23	684.23	1,56
ZM 523	Maïs + niébé	2039.74	825.74	1,68
<b>Moyenne</b>		<b>1983,21</b>	<b>769,21</b>	<b>1,63</b>
07 SADVE	Maïs + soja	1819.48	605.48	1,5
08 SADVE 1	Maïs + soja	1698.90	484.90	1,4
09 SADVE F2	Maïs + soja	2335.61	1121.61	1,92
Mudishi 1	Maïs + soja	1736.53	522.53	1,43
Mudishi 3	Maïs + soja	1623.53	409.53	1,34
Samaru	Maïs + soja	1668.74	454.74	1,37
VPO 538	Maïs + soja	1620.21	406.21	1,33
ZM 523	Maïs + soja	1494.33	280.33	1,23
<b>Moyenne</b>		<b>1749,67</b>	<b>535,67</b>	<b>1,44</b>
07 SADVE	Chaume de maïs	1772.34	558.34	1,46
08 SADVE 1	Chaume de maïs	1937.19	723.19	1,6
09 SADVE F2	Chaume de maïs	1724.51	510.51	1,42
Mudishi 1	Chaume de maïs	1644.65	430.65	1,35
Mudishi 3	Chaume de maïs	2316.42	1102.42	1,91
Samaru	Chaume de maïs	1792.64	578.64	1,48
VPO 538	Chaume de maïs	1481.61	267.61	1,22
ZM 523	Chaume de maïs	1660.05	446.05	1,37
<b>Moyenneé</b>		<b>1791,18</b>	<b>577,18</b>	<b>1,48</b>
Effet variétés		0,7053	0,7053	0,7053
Effet traitements		0,2600	0,2600	0,2600
Effet variétés x traitements		0,7952	0,7952	0,7952

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0.001 = '***'$  ;  $0.001 < \alpha < 0.01 = '**'$  ;  $0.01 < \alpha < 0.05 = '*'$  ;  $0.05 < \alpha < 0.1 = '†'$  ;  $0.1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .

## 2.4. Discussion

Les valeurs obtenues après analyse des échantillons de sol par le laboratoire de Crop Nutrition Laboratory Services montrent que l'état de fertilité du terrain d'expérimentation nécessite obligatoirement une fertilisation de la culture de maïs pour escompter une meilleur productivité suivant les besoins exigés par la culture (Matusso, 2014 ; Tshiabukole, 2018).

Les résultats obtenus pour le rendement en grains sont semblables à ceux obtenus avec le nombre de plant et la biomasse des épis. Ces résultats corroborent avec ceux rapportés par Kasetsart (1989) dans des essais conduits sur la ferme de Suwan, en Thaïlande, où le rendement en grains du maïs semé en monoculture dépassait de 31,9% le traitement maïs + soja. Une faible densité des plants par unité de surface entraîne une baisse de rendement en grains (Jeyakumaran et Seran, 2007). Le taux de semis de chaque culture dans l'association est ajusté en dessous de son taux maximal pour optimiser la densité des plants. Si le taux maximal de chaque culture était utilisé, on n'obtiendrait pas un bon rendement en grains à cause de la surpopulation (Nyembo, 2010). En réduisant les taux de chaque semis, les cultures ont une chance de bien produire au sein de l'association (Seran et Brintha, 2010, Useni *et al.*, 2014)). Le défi est de savoir de combien peut-on réduire les taux de semis.

Selon Agboola et Fayemi (1971), l'arrangement spatial de maïs et de légumineuses (cultures intercalaires ou de culture de maïs après la récolte des légumineuses) n'affecte pas le rendement en grains du maïs. Pourtant, un indice raisonnable de surface foliaire (LAI) est essentiel pour maintenir le taux de photosynthèse élevé ainsi que le rendement en grains (Xiaolei *et* Zhifeng, 2002). Prasad et Brook (2005) ont rapporté que l'augmentation de la densité des plants de maïs a eu un effet significatif, dans la culture intercalaire de maïs –soja, sur la capacité photosynthétique du soja (son indice foliaire), affectant ainsi le rendement en graines de la culture secondaire qu'est le soja.

Se rapportant aux résultats de Hardter *et al.* (1991), bien que la culture associée maïs-niébé avait des rendements en grains plus bas qu'en rotation, les monocultures de maïs en continue ont des productivités encore plus basses. Edmeades (1990) a rapporté des résultats similaires après expérimentations en multi-locaux aux champs au Ghana ont montré qu'en absence d'engrais, les rendements en grains du maïs en monoculture successive chutaient significativement, mais que cette chute de rendement en grains pouvait être complètement compensée par des apports d'engrais ou par une culture de niébé. Les niébés améliorent le rendement du maïs par l'azote qu'ils fixent et par des améliorations non précisées des conditions du sol.

De nombreuses études ont rapportés les effets hautement bénéfiques des légumineuses à graines sur la teneur en azote des sols et le rendement en grains des céréales (De *et al.*, 1983, Kumar Rao *et al.*, 1983). Les travaux du CIPEA au Mali ont montré que l'introduction du niébé dans

la rotation a entraîné une augmentation de 60% des rendements en grains du mil, par rapport aux niveaux obtenus lors de la première année de culture (CIPEA, 1984).

Selon Bandyopadhyay et De (1986), cette fertilité du sol s'expliquerait par les effets résiduels sur les céréales succédant les légumineuses dans la rotation et par les transferts souterrains d'éléments nutritifs qui se produisent dans la rhizosphère lors des associations. Il ressort que l'usage du système de culture sous couvert végétal mort (ou paillis) augmente le rendement en grains du maïs comme l'a rapporté Scopel (1994). Il s'est avéré que la plupart des variétés se sont comportées de la même façon dans chacun des traitements. La variété Mudishi 1 a vu son rendement en grains augmenté de plus de 250% lorsqu'elle a été semée sur un sol couvert d'une litière issue de fanes de niébé et de chaumes de maïs (Tableau II.4). Comparativement aux résultats présentés dans le système de culture en association, la présence du paillis a nettement influencé le rendement en grains. Ces résultats montrent que, même à faibles doses de paillis (5cm d'épaisseur de résidus), un effet considérable peut être observé sur le comportement des plantes. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par Van Asten *et al.* (2007). Ces résultats s'expliqueraient, selon Puckridge et French (1983), Thurston (1997), Dounias et Jouve (2001), Capillon et Ségué (2002), par le fait que le semis sous couvert végétal mort améliore davantage la fertilité des sols de culture et occasionne une bonne productivité des surfaces cultivées. Mc Kenney *et al.* (1993); Mary *et al.* (1996); Abiven (2001) ; Schroth *et al.* (2001) ont montré qu'il y avait augmentation de la disponibilité de l'azote suite à la dégradation et à la minéralisation des paillis des légumineuses par rapport au sol nu. Un enrichissement en matières organiques et en minéraux sous l'effet du recyclage des résidus a été étudié par Owens et Edwards (1993) sur la rotation maïs-soja en mettant en évidence le recyclage du carbone et de l'azote grâce à la production de biomasse végétale de légumineuse.

Les associations des différentes variétés de maïs avec soja ont produit des valeurs plus élevées de productions et de bénéfice net par rapport aux associations maïs–niébé et les différentes monocultures, dues probablement aux rendements obtenus dans chaque système (Seran et Brintha, 2010). Le grand bénéfice produit dans l'association de maïs-soja comparé aux autres systèmes pourrait être du probablement aux résultats du rendement et du prix élevés du soja comparativement au maïs (Dwivedi *et al.*, 2015). La culture intercalaire procure souvent un rendement financier plus élevé que la monoculture. La culture intercalaire occupe une plus grande utilisation des terres et génère ainsi des rendements nets plus élevés (Kizungu *et al.*, 2021). Kalra et Ganger (1980) et Kizungu *et al.* (2021) ont indiqué que la culture intercalaire

contribuait à augmenter la production agricole de manière durable. La culture intercalaire donnait généralement des rendements combinés et des rendements monétaires supérieurs à ceux obtenus avec l'une ou l'autre culture en monoculture. Dans un système de culture intercalaire innovant et amélioré, nommé MBILI (kiswahili pour « deux », et acronyme de « Gestion des interactions bénéfiques dans les cultures intercalaires de légumineuses »), également connu sous le nom d'arrangement échelonné deux par deux (Tungani *et al.*, 2002), le système MBILI a entraîné une forte augmentation des rendements des cultures et des avantages nets, par rapport au système de culture intercalaire conventionnel. Le système MBILI n'entraînait pas de coûts de main-d'œuvre plus élevés et Woomer (2007) a montré que le système MBILI était rentable dans un large éventail de terres cultivées de petits exploitants dans l'ouest du Kenya, et que, lorsqu'il était combiné à une application d'engrais à un taux modeste; le rapport production-coûts était plus élevé par rapport aux autres technologies recommandées dans la région.

## **2.5. Conclusion**

Cette étude visait d'abord la réponse de la culture du maïs en association et en rotation avec des légumineuses sur la base des principes de fonctionnement des SCV, dans le but d'en déterminer la combinaison optimisant la production en grains et la biomasse totale du système. Il s'est avéré que les effets résiduels des cultures de niébé a accru considérablement le rendement du maïs. Quant à la production des légumineuses mises en association avec le maïs, le soja s'est révélé plus performant par rapport au niébé. Toutes les variétés de maïs ont présenté chacune une combinaison optimisant la productivité. Les variétés 09SADVE F<sub>2</sub>, Mudishi1, Mudishi3, VPO538 et Zm523 ont doublé, triplé ou quadruplé leurs rendements lorsqu'elles sont mises en rotation avec le niébé. La monoculture du maïs, produisant un paillis pauvre, a occasionné des faibles de rendement en deuxième saison allant jusqu'à des pertes de plus de 5%. Cette étude visait aussi l'acquisition des connaissances sur la rentabilité. Les rendements élevés en grains enregistrés au cours de cette étude ont occasionné des bénéfices importants en augmentant leurs ratios que se soit en culture d'association ou en rotation.

## **Chapitre 3. Evaluation du rendement et des indices de compétitivité pour les cultures d'association de huit variétés de maïs, du soja et du niébé dans la zone de savane du sud-ouest de la République Démocratique du Congo, « Cas de Mvuazi »**

### ***3.1. Introduction***

Les cultures d'association ont gagné de l'intérêt en raison des avantages potentiels qu'elles offrent sur le rendement des cultures auxquelles elles sont associées, c'est à dire une meilleure utilisation des ressources impliquant l'augmentation des rendements des récoltes ainsi qu'une fiabilité au système croissant de saison en saison. Quand une légumineuse est cultivée en association avec une autre culture comme une céréale, la nutrition azotée de la culture associée peut être améliorée par transfert direct d'azote symbiotique de la légumineuse à la céréale (Giller et Wilson, 1991). C'est ainsi que plusieurs systèmes ont été proposés afin de résoudre les problèmes d'épuisement de terre de culture (Puckridge et French, 1983 ; Machet *et al.*, 1997), entre autre le système de culture Sous Couvert Végétal (SCV) (FAO, 2005).

Les études menées à travers le monde ont montré que le système de semis direct sur couvert végétal assure une bonne productivité des surfaces cultivées et donne beaucoup d'avantages dans la gestion du sol (Masson et Bertoni, 1996 ; Thurston, 1997 ; Azontonde *et al.*, 1998 ; Capillon et Seguy, 2002 ; CIALCA, 2008).

La culture d'association céréales-légumineuses a été populaire dans les tropiques (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001b ; Tsubo *et al.*, 2005) et dans les contrées semi-arides du monde (Banik *et al.*, 2000 ; Ghosh, 2004 ; Agegnehu *et al.*, 2006 ; Dhima *et al.*, 2007), principalement, en raison de ses avantages pour la conservation du sol (Anil *et al.*, 1998), le contrôle de mauvaises herbes (Poggio, 2005 ; Banik *et al.*, 2006), la résistance à la verse, l'augmentation du rendement (Anil *et al.*, 1998 ; Chen *et al.*, 2004), et le contrôle des infections des parasites par les racines des légumineuses (Fenandez-Aparicio *et al.*, 2007).

Différents rapports de semis ou modèles de plantation pour la culture d'association céréale-légumineuse ont été pratiqués par beaucoup de chercheurs (Tsubo *et al.*, 2001 ; Banik *et al.*, 2006 ; Dhima *et al.*, 2007). La compétition qui existe dans la culture mixte pourrait être l'aspect principal affectant le rendement par rapport à l'implantation des cultures pures des céréales (Yilmaz *et al.*, 2008).



En effet, plusieurs auteurs ont proposé un certain nombre d'indices pour évaluer la compatibilité des différents types d'associations céréales-légumineuses (Banik *et al.*, 2000 ; Ghosh, 2004 ; Agegnehu *et al.*, 2006 ; Banik *et al.*, 2006 ; Dhima *et al.*, 2007). Certains indices tels que Land Equivalent Ratio (LER), Area Time Equivalent Ratio (ATER), Relative Crowding Coefficient (RCC ou K), Competitive Ratio (CR), aggressivity (A), and monetary advantage (MA), ont été développés pour décrire la compétition et l'avantage économique possible dans une culture d'association (Hiebsch, 1980 ; Banik *et al.*, 2000 ; Ghosh, 2004 ; Midya *et al.*, 2005 ; Lithouragidis *et al.*, 2011). Ces indices qui sont des dérivations mathématiques peuvent aider les chercheurs à récapituler, interpréter, et présenter les résultats des essais de compétitivité entre différentes cultures (Weigelt et Jolliffe, 2003). Les indices peuvent s'exprimer différemment suivant chaque niveau de compétition des plantes en association, y compris son intensité, ses effets, et ses résultats. Ils aident dans l'interprétation des données complexes et permettent la comparaison des résultats de différentes études avec l'utilisation du même indice. Parmi tous les indices pris en compte pour évaluer la compétitivité entre les cultures, le LER est le plus couramment utilisé (Agegnehu *et al.*, 2006).

Au cours de cette étude, nous avons utilisé un modèle de semis, en monoculture et en semis sous couvert végétal (SCV), avec huit différentes variétés de maïs et deux espèces de légumineuses (le soja et le niébé), afin d'évaluer le rendement en grains des cultures, de déterminer quel système de culture peut permettre des avantages dans le rendement en grains de chaque culture ainsi qu'un revenu socio-économique plus élevé par l'examen des indices de compétitivité et d'avantage économique du maïs et des légumineuses.

## **3.2. Matériels et méthode**

### **3.2.1. Matériels**

Cette expérimentation a été conduite durant une saison de la campagne 2011-2012, à la station de recherche de l'INERA Mvuazi. L'essai a été exécuté sur un terrain non labouré et débarrassé de tout résidu couvrant le sol, par le semis de huit différentes variétés de maïs, à cycle végétatif variant entre 90-110 jours, dont deux variétés biofortifiées à haute teneur en protéine de qualité (QPM variétés Mudishi 1 et Mudishi 3) et six variétés ordinaires (Samaru, 07 SADVE, 08 SADVE 1, 09 SADVE-F<sub>2</sub>, ZM 523 et VPO 538) ; ainsi que deux espèces de légumineuses à cycle végétatif précoce (< 100 jours) dont le soja (variété Vuangi) et le niébé (variété H4) (cfr tableau 2.1.).

### 3.2.2. Méthode

#### 3.2.2.1. Dispositif expérimental

Cette expérimentation a été mise en place suivant un dispositif en tiroirs (parcelles croisées ou split-plot). Les traitements, répétés quatre fois et placés dans des parcelles de 6m x 4m, consistaient (monoculture et culture d'association en intercalaire) à semer le maïs aux écartements de 1m x 0,25m pour une densité de 4 plantes par m<sup>2</sup>. Tandis que les légumineuses ont été semées aux écartements de 0,33m x 0,055m et (culture pure et d'association) pour une densité de 36 plantes par m<sup>2</sup> (Paliwal *et al.*, 2002). Les traitements témoins représentent les parcelles de monocultures de légumineuses et de maïs (Figure 3.1.).

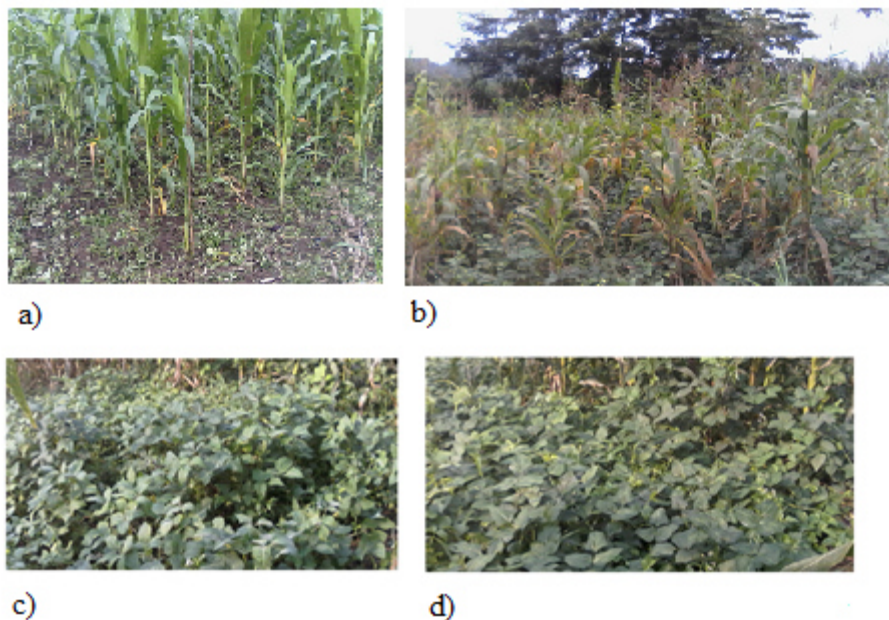


Figure 3.1. : Parcelles de a) maïs semés en monoculture ; b) maïs en association avec le soja ; c) monoculture de soja ; d) monoculture de niébé

#### 3.2.2.2. Calcul d'indices de compétitivité

L'efficacité des différents écartements et les effets de la compétition entre les 3 espèces utilisées dans cette expérience ont été calculés en utilisant les différents indices de compétition. Des graines de chaque espèce ont été pesées et ajustées sur les niveaux constants d'humidité, et le maïs a été considéré comme composante principale et les légumineuses comme composantes secondaires dans les systèmes de cultures d'associations en intercalaire. Le rendement du maïs

de chaque parcelle a été converti, pour le système de culture d'association en intercalaire, en Rendement Equivalent du maïs (MEY) comme suit (Anuaneyulu *et al.*, 1982) :

$$MEY = Y_{\text{maïs}} + Y_{\text{légumineuse}} \times \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Eq.3.1})$$

Où :

$Y_{\text{maïs}}$  et  $Y_{\text{légumineuse}}$  est le rendement en grains du maïs et des légumineuses en association ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),

$P_1$  le prix des légumineuses (CDF  $\text{kg}^{-1}$ ),  $P_2$  le prix du maïs (CDF  $\text{kg}^{-1}$ ),

$MEY$  le rendement équivalent du maïs dans le système de culture mixte ( $\text{kg ha}^{-1}$ )

L'avantage de la culture d'association en intercalaire et l'effet de la concurrence entre les deux espèces utilisées dans un mélange ont été calculés en utilisant des indices de concurrence différents. L'indice de Rapport de surface équivalente ou « Land Equivalent Ratio » (LER) a été utilisé comme premier critère de détermination de l'efficacité des associations et des monocultures pour les légumineuses (soja et niébé) et le maïs (Willey et Osiru, 1972 ; Willey, 1979a). Quand LER est supérieur à 1, l'association favorise la croissance et le rendement de l'espèce. En revanche, quand LER est inférieur à 1, l'association affecte négativement la croissance et le rendement des espèces semés en culture mixte (Ofori et Stern, 1987 ; Dhima *et al.*, 2007 ; Yilmaz *et al.*, 2008 ; Lithourgidis *et al.*, 2011 ; Muyayabantu *et al.*, 2013). Les valeurs de LER ont été calculées comme suit:

$$LER = (LER_{\text{maïs}} + LER_{\text{légumineuse}}), \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Où :

$$LER_{\text{maïs}} = (Y_{ml}/Y_m), \text{ et } LER_{\text{légumineuse}} = Y_{lm} / Y_l,$$

$Y_m$  et  $Y_l$  sont respectivement les rendements du maïs et des légumineuses des cultures pures,

$Y_{ml}$  et  $Y_{lm}$  sont respectivement les rendements du maïs et des légumineuses en association.

Le second indice est le « area time equivalent ratio » (ATER), il fournit une comparaison plus réaliste des rendements avantageux dans l'association par rapport à la monoculture en termes

de temps que prennent les différentes espèces dans les systèmes de culture mixte, plutôt que LER. ATER a été calculé par la formule développée par Hiebsch (1980) :

$$ATER = \frac{(RY_{\text{maïs}} \times T_{\text{maïs}}) + (RY_{\text{légumineuse}} \times T_{\text{légumineuse}})}{T} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

(Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001a)

Où :

$RY_{\text{maïs}}$  = rendement relatif du maïs dans l'association,

$T_{\text{maïs}}$  = la durée du cycle (en jours) du maïs,

$RY_{\text{légumineuse}}$  = rendement relatif de la légumineuse dans l'association,

$T_{\text{légumineuse}}$  = la durée du cycle (en jours) de la légumineuse

$T$  = durée totale de l'association (en jours).

L'interprétation d'ATER implique que si  $ATER > 1$ , nous avons un rendement avantageux ; si  $ATER = 1$ , il n'y a aucun effet de l'association ;  $ATER < 1$  montre qu'il n'y a pas de rendements avantageux.

Le troisième indice est le « Relative Crowding Coefficient » (RCC ou K), qui est une mesure de la dominance relative d'un excédent d'une espèce par rapport à l'autre dans une association (De Wit, 1960 ; Cousins *et* O'Neil, 1993 ; Banik *et al.*, 2006 ; Dhima *et al.*, 2007 ; Yilmaz *et al.*, 2008). Le K a été calculé comme suit:

$$K = (K_{\text{maïs}} \times K_{\text{légumineuse}}), \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Où :

$$K_{\text{maïs}} = Y_{ml} \times Z_{lm} / ((Y_m - Y_{ml}) \times Z_{ml})$$

$$\text{et } K_{\text{légumineuse}} = Y_{lm} \times Z_{ml} / ((Y_l - Y_{lm}) \times Z_{lm})$$

$Z_{ml}$  et  $Z_{lm}$  sont respectivement, les densités du maïs et de la légumineuse dans chaque association.

Quand la valeur de K est  $> 1$ , il y a un avantage de rendement dans l'association ; quand  $K = 1$ , il n'y a pas de rendement avantageux ; et, quand  $K < 1$ , l'association est désavantageuse (Gosh, 2004 ; Dhima *et al.*, 2007 ; Esmaili *et al.*, 2011).

Le quatrième indice est celui de l' « agressivity » (A) : il est plus employé pour déterminer le rapport concurrentiel entre 2 récoltes utilisées dans la culture d'association en intercalaire (Willey, 1979b ; Yilmaz *et al.*, 2008). Il a été formulé comme suit :

$$A_{\text{légumineuse}} = (Y_{lm} / Y_l \times Z_{lm}) - (Y_{ml} / Y_m \times Z_{ml}) \quad (\text{Eq.3.5}) \text{ et}$$

$$A_{\text{maïs}} = (Y_{ml} / Y_m \times Z_{ml}) - (Y_{lm} / Y_l \times Z_{lm}) \quad (\text{Eq.3.6}) (\text{Dhima } et al., 2007)$$

Par exemple, si  $A_{\text{maïs}} = 0$ , les deux cultures sont en compétition égale, si  $A_{\text{maïs}}$  est positif, alors le maïs est dominant dans l'association, si  $A_{\text{maïs}}$  est négatif, alors le maïs n'est pas dominant. En outre, le Competitive Ratio (CR) est une autre manière d'évaluer la concurrence entre les différentes espèces.

Willey *et Rao* (1980) ont suggéré le « competition ratio » (CR) au lieu de l'agressivité pour indiquer le niveau de concurrence d'une espèce mise en compétition avec une autre espèce dans un système de culture mixte. Ce cinquième indice (CR) donne une capacité concurrentielle plus souhaitable pour les récoltes et il est également avantageux comme les indices K et AYL (Dhima *et al.*, 2007). Le CR représente chaque LER des deux associations des composants et il tient compte des proportions des cultures dans lesquelles ils ont été initialement semés (Esmaeili *et al.*, 2011). Le CR a été calculé comme suit :

$$CR_{\text{maïs}} = (LER_{\text{maïs}} / LER_{\text{légumineuse}}) (X_{\text{légumineuse-maïs}} / X_{\text{maïs-légumineuse}}) \quad (\text{Eq.3.5})$$

$$CR_{\text{légumineuse}} = (LER_{\text{légumineuse}} / LER_{\text{maïs}}) (X_{\text{maïs-légumineuse}} / X_{\text{légumineuse-maïs}}) \quad (\text{Eq.3.6})$$

Basé sur le rendement de chaque récolte des espèces, Banik *et al.* (2000) ont rapporté que l'indice de « Actual Yield Loss » (AYL) fournit des informations plus précises sur la concurrence par rapport aux autres indices (entre et dans les récoltes des espèces) et le comportement de chaque espèce dans un système de culture d'association. Ce sixième indice (l'AYL) est la perte ou le gain proportionnel du rendement des associations par rapport à la monoculture ; il tient compte de la proportion réelle des espèces composantes semées en association ou en monoculture. En outre, la perte partielle de rendement réel ( $AYL_a$  et  $AYL_b$ ) représente la perte de rendement ou le gain proportionnel de chaque espèce une fois développée comme association, relativement à leur rendement dans la monoculture. L'AYL est calculé selon la formule suivante (Banik, 1996):

$$\text{Actual Yield Loss or gain (AYL)} = AYL_a + AYL_b$$

Où:

$$AYL_a = \left[ LER_a \times \left( \frac{100}{Z_{ab}} \right) - 1 \right] \text{ et } AYL_b = \left[ LER_b \times \left( \frac{100}{Z_{ba}} \right) - 1 \right] \quad (\text{Eq.3.8})$$

### 3.2.3. Indices des avantages monétaires

Aucun des indices de concurrence mentionnés ci-dessus ne fournit une information sur l'avantage économique du système d'association. Pour cette raison, Ghosh (2004) a proposé l'indice de l'avantage monétaire (MAI), le septième indice qui a été calculé comme suit :

$$MAI = \frac{(valeur\ de\ l'association\ combinée) \times (LER - 1)}{LER} \quad (Eq.3.9)$$

Plus la valeur de MAI est élevée, plus le système de culture d'association en intercalaire est profitable (Ghosh, 2004). En outre, le huitième indice qu'est l' « Intercropping Avantage » (IA) a été calculé en utilisant la formule suivante (Banik *et al.*, 2000) :

$$IA_{maïs} = AYL_{maïs} \times P_{maïs} \quad (Eq.II.10)$$

$$IA_{légumineuse} = AYL_{légumineuse} \times P_{légumineuse} \quad (Eq.3.11)$$

Où  $P_{maïs}$  est la valeur marchande du maïs (le prix actuel courant est de 0.67 \$ USD par kg), et  $P_{légumineuse}$  est la valeur marchande des légumineuses (le prix actuel courant est de 1 \$ USD par kg pour le niébé et le soja).

### 3.2.4. Analyse des données

Des données ont été analysées en utilisant l'ANOVA et la séparation des moyennes (test de turkey) a été utilisée pour déterminer les différences entre les traitements, à l'aide du logiciel R 3.1.2. L'analyse en composante principale (ACP) a été utilisée pour représenter les corrélations entre les paramètres de compétitivité et d'avantage monétaire pour montrer l'intérêt du système en SCV.

### **3.3. Résultats et discussion**

#### **3.3.1. Le Rendement et l'Indice de « maize equivalent yield »**

Concernant le rendement en grain, une différence significative a été observée ( $p < 0,05$ ) entre les traitements. La moyenne en monoculture a été plus importante (2350,2 kg/ha), comparée aux associations des cultures : 1342,9 kg/ha pour le niébé et 2081,9 kg/ha pour le soja. Par conséquent, le meilleur rendement a été enregistré en monoculture de Samaru avec 2849,44kg/ha. Ce résultat est similaire à celui rapporté par Kasetsart (1989) dans des essais conduits sur la ferme de Suwan, en Thaïlande, où le rendement du maïs semé en monoculture dépassait de 31,9% le traitement d'association maïs-soja. Un indice raisonnable de surface foliaire (LAI) est essentiel pour maintenir le taux de photosynthèse élevé ainsi que le rendement (Xiaolei et Zhifeng, 2002). Prasad et Brook (2005) ont rapporté que l'augmentation de la densité des plants de maïs a eu un effet significatif sur la LAI dans la culture d'association en intercalaire de maïs -soja.

Les analyses des variances portées sur les moyennes des données de rendement des légumineuses ont montré une différence significative ( $p < 0,05$ ) entre les traitements et les interactions pour le rendement en graines des légumineuses (Tableau 3.1). La monoculture de soja s'est révélée plus productrice (1802,23kg/ha), qu'en association avec le maïs (809,31kg/ha). De même, la monoculture de niébé a produit plus (178,2 kg/ha) qu'en association avec le maïs (48,39 kg/ha). Ce résultat a déjà été rapporté par Hardter *et al.* (1991) bien que la culture associée maïs-niébé avait des rendements plus bas qu'en rotation, les monocultures en continue ont des productivités plus basses. Bien que les cultures pures de légumineuses ont maintenu leur supériorité sur le système de culture mixte seulement pour le soja, la même proportion (50% de soja et 50% de niébé) utilisée en monoculture mise en association, a augmenté les rendements en grains de chaque variété de maïs, mais a diminué ceux du soja et augmenté celle du niébé.

Le rendement total des cultures mixtes le plus élevé a été obtenu avec Mudishi3-soja (3108,89 kg.ha-1) (tableau 3.1). MEY a été calculé et était plus élevé dans le système d'association avec le soja (tableau 3.1.) comparé aux monocultures.

Les cultures d'association du maïs avec le soja et le niébé ont eu comme conséquence des équivalents totaux de rendements en grains de maïs plus élevés, comparés aux rendements totaux de l'association pour chaque espèce récoltée (tableau 3.1.). Ceci serait attribué à l'effet

complémentaire dans l'association des légumineuses par le transfert nutritif. Des résultats similaires ont été obtenus par Ofori et Stern (1987).

**Tableau 3.1. Rendement en grain en monoculture et en culture mixte du maïs et des légumineuses**

Variétés	Traitements	Rendement (kg/ha)		Rendement total (kg ha <sup>-1</sup> )	MEY (kg ha <sup>-1</sup> )
		maïs	légumineuses		
07 SADVE	Monoculture	2665,86 a	-	2665,86 a	2665,86 ab
08 SADVE 1	Monoculture	2129,52 a	-	2129,52 a	2129,52 ab
09 SADVE F2	Monoculture	2128 a	-	2128 a	2128 ab
Mudishi 1	Monoculture	2402,4 a	-	2402,4 a	2402,4 ab
Mudishi 3	Monoculture	2283,62 a	-	2283,62 a	2283,62 ab
Samaru	Monoculture	2849,44 a	-	2849,44 a	2849,44 ab
VPO 538	Monoculture	2277,22 a	-	2277,22 a	2277,22 ab
ZM 523	Monoculture	2065,53 a	-	2065,53 a	2065,53 ab
<b>Moyenne</b>	<b>Monoculture</b>	<b>2350,20 a</b>	-	<b>2350,20 a</b>	<b>2350,20 ab</b>
<b>Niébé</b>	<b>Monoculture</b>	-	<b>178,2 b</b>	<b>178,2 b</b>	-
<b>Soja</b>	<b>Monoculture</b>	-	<b>1802,23 a</b>	<b>1802,23 a</b>	-
07 SADVE	Mixte + niébé	1999,73 a	76 c	2075,73 abc	2060,52 ab
08 SADVE 1	Mixte + niébé	1298,92 a	15,78 c	1314,7 bc	1311,55 ab
09 SADVE F2	Mixte + niébé	965,13 a	39,67 c	1004,8 bc	996,86 ab
Mudishi 1	Mixte + niébé	753,6 ab	38,29 c	791,89 c	784,24 b
Mudishi 3	Mixte + niébé	1351,04 a	19,78 c	1370,82 bc	1366,87 ab
Samaru	Mixte + niébé	2028,88 a	96,14 c	2125,02 ab	2105,79 ab
VPO 538	Mixte + niébé	1133,73 a	33,28 c	1167,01 bc	1160,36 ab
ZM 523	Mixte + niébé	1212,45 a	68,2 c	1280,65 bc	1267,02 ab
<b>Moyenne</b>		<b>1342,94 c</b>	<b>48,39 c</b>	<b>1391,33 bc</b>	<b>1381,65 b</b>
07 SADVE	Mixte + soja	2206,49 a	546,92 b	2753,41 a	3026,87 ab
08 SADVE 1	Mixte + soja	2040,76 a	932,37 a	2973,13 a	3439,31 ab
09 SADVE F2	Mixte + soja	1843,63 a	885,49 a	2729,12 a	3171,86 ab
Mudishi 1	Mixte + soja	2113,15 a	859,44 a	2972,59 a	3402,32 ab
Mudishi 3	Mixte + soja	2291,12 a	817,77 a	3108,89 a	3517,78 a
Samaru	Mixte + soja	2113,9 a	718,81 ab	2832,71 a	3192,12 ab
VPO 538	Mixte + soja	1984,68 a	838,61 a	2823,29 a	3242,59 ab
ZM 523	Mixte + soja	2062,06 a	875,07 a	2937,13 a	3374,67 ab
<b>Moyenne</b>		<b>2081,97 b</b>	<b>809,31 a</b>	<b>2891,28 a</b>	<b>3295,94 a</b>
Effet variétés		ns	**	ns	ns
Effet traitements		***	***	***	***
Effet variétés x traitements		ns	**	ns	ns

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*'; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*'; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*'; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '†'; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = 'ns'.

### 3.3.2. Le taux d'équivalence en superficies cultivées et leur capacité concurrentielle

Les analyses ont montré des différences très significatives ( $p < 0,05$ ) entre traitements pour l'indice de  $LER_{\text{maïs}}$ . Aucune différence significative n'a été observée pour les autres indices. Le  $LER_{\text{maïs}}$ , dans les cultures d'association a varié entre 0,3124 et 0,7299 pour le niébé et entre 0,7342 et 1,0041 pour la fève produisant une gamme de 2,9046 à 4,5995 (tableau 3.2). La



valeur la plus élevée (4,5995) a été obtenue à partir de la combinaison de Mudishi 3-niébé (tableau 3.2). Les effets d'interaction des traitements n'étaient pas significatifs pour LER partiel et total, ATER, K partiel et total,  $A_{\text{maïs}}$  et  $A_{\text{légumineuse}}$  et CR total impliquant que la monoculture et les cultures d'association n'ont pas répondu aux différents traitements durant la période de croissance (tableau 3.2).

Les résultats ont montré que le LER partiel du maïs était supérieur à 0,50 pour toutes les cultures intercalaires, ce qui indique qu'il y avait un avantage pour le maïs, à l'exception de Mudishi 1-niébé (0,31) et VP0538-niébé (0,46) (tableau 3.2). L'analyse de la variance a montré qu'il y avait des différences significatives entre les traitements ( $p < 0,05$ ) pour le  $LER_{\text{maïs}}$ . D'autre part, les valeurs moyennes de LER partiel de niébé étaient inférieures à 0,5, sauf pour les cultures intercalaires avec 07SADVE, Samaru et VP0538, ce qui indique qu'il y avait un désavantage pour le niébé. Le LER partiel du soja était supérieur à 0,5 pour toutes les cultures intercalaires, ce qui indique qu'il y avait un avantage pour le soja (Chen *et al.*, 2004), à l'exception des cultures intercalaires avec 07SADVE et Samaru.

**Tableau 3.2. Indices de compatibilité des cultures en association**

Variétés	Traitement	LER			ATER	RCC ou K			A		CR	
		Maïs	Légumineuses	Total		Maïs	Légumineuses	Total	Maïs	Légumineuses	Maïs	Légumineuses
07 SADVE	niébé	0,7 6 b	0,63	1,39	1,32	60,32	3,41	172,72	0,173	-0,17	20,96	0,09
08 SADVE 1	niébé	0,57 b	0,12	0,70	0,64	59,24	0,016	1,67	0,14	-0,14	56,22	0,032
09 SADVE F2	niébé	0,6 3 b	0,26	0,89	0,83	-2,86	0,11	0,80	0,15	-0,15	98,63	0,071
Mudishi 1	niébé	0,31 b	0,38	0,69	0,66	4,62	0,12	0,62	0,068	-0,067	16,42	0,17
Mudishi 3	niébé	0,6 1 b	0,16	0,77	0,72	140,34	0,025	8,39	0,15	-0,15	57,96	0,033
Samaru	niébé	0,7 3 b	0,66	1,39	1,32	-361,93	0,010	79,45	0,16	-0,16	30,27	0,093
VPO 538	niébé	0,46 b	0,31	0,78	0,73	39,23	0,057	3,38	0,11	-0,11	13,79	0,084
ZM 523	niébé	0,6 1 b	0,56	1,16	1,11	-2,66	-0,048	3,93	0,14	-0,14	35,34	0,087
07 SADVE	soja	0,84 a	0,38	1,22	1,15	-65,92	0,104	0,71	0,20	-0,20	25,70	0,053
08 SADVE 1	soja	1,00 a	0,67	1,66	1,57	-71,98	0,098	76,31	0,23	-0,23	17,10	0,07
09 SADVE F2	soja	0,9 8 a	0,58	1,56	1,47	32,26	0,26	11,03	0,23	-0,23	19,72	0,088
Mudishi 1	soja	0,89 a	0,59	1,48	1,40	147,01	0,45	-10,04	0,21	-0,21	16,73	0,070
Mudishi 3	soja	1,00 a	0,54	1,55	1,46	93,77	0,22	30,55	0,24	-0,24	19,78	0,06
Samaru	soja	0,73 a	0,46	1,19	1,13	56,01	0,14	4,47	0,17	-0,17	18,05	0,074
VPO 538	soja	0,90 a	0,56	1,45	1,37	271,71	0,26	24,84	0,21	-0,21	16,12	0,067
ZM 523	soja	0,96 a	0,57	1,53	1,44	2,22	0,24	8,14	0,22	-0,22	18,04	0,086
Effet variétés		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Effet traitements		***	ns	***	**	ns	ns	ns	***	***	ns	ns
Effet variétés x traitements		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0,001 = '***'$  ;  $0,001 < \alpha < 0,01 = '**'$  ;  $0,01 < \alpha < 0,05 = '*'$  ;  $0,05 < \alpha < 0,1 = '†'$  ;  $0,1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .

LER a montré des influences positives sur la croissance et le rendement des cultures intercalaires de maïs et soja (LER>1) avec la moyenne la plus élevée obtenue avec l'association 08SADVE 1-soja (1,66). Cela indique qu'une portion de 66% (0,66 ha) de superficie serait requise pour le système en monoculture pour égaler le rendement du système intercalaire (Midya *et al.*, 2005). Dans ces cas, le LER total était significativement différent ( $p<0,01$ ) et les valeurs étaient  $> 1$  montrant des avantages de la culture intercalaire sur le système en monoculture pour ce qui est de l'utilisation de ressources environnementales pour la croissance des plantes (Mead et Willey, 1980). Des résultats similaires ont été rapportés pour les proportions des cultures mixtes de pois-orge (Chen *et al.*, 2004), de haricot-blé (Hauggaard-Nielsen *et al.*, 2001c) et de maïs-haricot (Li *et al.*, 1999). Les valeurs partielles de LER ont également montré que, par rapport au soja, le niébé semble avoir une efficacité d'utilisation des terres plus avantageuse dans toutes les associations.

LER ne considère pas le temps que mettent les cultures sur terrain et il est basé sur les produits récoltés et non sur la proportion de rendement souhaitée des cultures considérées. En outre, le choix du rendement en monoculture pour l'estimation du rendement des associations dans l'évaluation du LER n'est pas clair (Willey, 1979b). Par conséquent, l'« area time equivalent ratio » (ATER) fournit une comparaison plus réaliste de l'avantage de rendement de la culture intercalaire sur la monoculture en termes de variations du temps pris par les cultures qui composent les différents systèmes intercalaires (Aasim *et al.*, 2008).

Les données présentées dans le tableau 3.2. montrent que, dans tous les ensembles intercalaires de maïs-légumineuses, les valeurs d'ATER étaient inférieures aux valeurs de LER indiquant l'estimation excessive de l'utilisation des ressources en raison des variations importantes des périodes de maturité des cultures dont le maïs qui est resté plus longtemps sur terrain et ont eu suffisamment de temps pour compenser la concurrence des légumineuses. ATER est exempt de problèmes d'estimation excessive de l'utilisation des ressources contrairement au LER. Les valeurs d'ATER ont montré un avantage de 57% dans l'association 08SADVE 1-soja (tableau 3.2). Cela pourrait être dû à un effet significatif du LAI dans les cultures intercalaires de maïs avec le soja (Prasad et Brook, 2005).

Bien que l'analyse statistique entre les valeurs K partielles des légumineuses et du maïs n'a pas donnée de différence significative, il semble que le  $K_{\text{maïs}}$  soit plus élevé que le  $K_{\text{légumineuses}}$  dans le cas des associations maïs-niébé et maïs-soja, ce qui indique que le maïs est plus compétitif que sa culture associée, à l'exception du niébé en association avec 09SADVE F2, Samaru et ZM523, et le soja en association avec 07SADVE et 08SADVE1 (tableau 3.2). Des résultats

similaires ont été rapportés par Banik *et al.* (2000) dans les cultures intercalaires de pois chiches-blé et Dhima *et al.* (2007) dans les cultures intercalaires de céréales-vetch. Le K total était supérieur à un dans le cas de toutes les cultures intercalaires avec du niébé et du soja, ce qui indique un avantage de rendement à l'association (Banik *et al.*, 2000). Cependant, dans l'association maïs-niébé (09SADVE F2 et Mudishi1) et maïs-soja (07SADVE et Mudishi1), le K total était inférieur à un, ce qui indique qu'il y avait un désavantage de rendement (Willey et Rao, 1980; Ghosh, 2004). Les valeurs K ont suivi une tendance similaire des valeurs de LER.

### **3.3.3. Agressivité, ratio compétitif (CR) et perte de rendement actuel**

Dans toutes les associations, les valeurs de  $A_{\text{maïs}}$  positives ont montré que le maïs était l'espèce dominante (tableau 3.2). Le maïs associé avait des rapports de compétition plus élevés (CR) dans toutes les associations; cependant, le niébé avait des valeurs de CR supérieures à celles du soja avec les variétés 09SADVE F2 (98,63), Mudishi3 (57,96) et 08SADVE1 (56,22). Les résultats de CR corroborent également ceux de l'indice d'agressivité. Les valeurs de A et CR pour le niébé ont indiqué que le niébé était plus compétitif que le soja dans les associations avec le maïs. Selon Yilmaz *et al.* (2008), bien que l'augmentation du ratio de la céréale dans les associations ait augmenté la valeur de la compétitivité par rapport aux légumineuses, le double du rapport pourrait entraîner la concurrence entre les plants de maïs, ce qui a probablement entraîné une croissance plus faible et une baisse des valeurs de CR et  $A_{\text{maïs}}$ . Cela a également été confirmé par les valeurs de l'indice  $AYL_{\text{maïs}}$  négatives qui l'étaient que lorsque le taux de maïs était le plus élevé. Cela est probablement dû au fait que la capacité de fixation de l'azote atmosphérique des légumineuses n'a pas compensé la croissance vigoureuse des céréales dans une certaine proportion.

En particulier,  $AYL_{\text{maïs}}$  a eu une valeur positive et n'a été plus élevée que dans la culture intercalaire de Mudishi3-soja, mais cette augmentation a été d'un avantage de rendement de 0,41% (0,0041) par rapport à la monoculture. Ce qui indique un avantage de rendement pour le maïs probablement en raison de l'effet positif du soja sur la variété Mudishi3 cultivée en intercalaires (Banik, 1996; Banik *et al.*, 2000). Selon Banik *et al.* (2000), l'indice AYL peut donner des informations plus précises que les autres indices sur la concurrence inter et intra-spécifique des cultures composantes et le comportement de chaque espèce impliquée dans les systèmes intercalaires. La quantification de la perte de rendement ou du gain en raison de la culture intercalaire avec d'autres espèces ou de la variation de la population de la plante n'a pu

être obtenue par des LER partiels, alors que l'AYL partielle montre la perte ou le gain du rendement par son signe et sa valeur.

### **3.3.4. Indices d' "Intercropping advantages" et de "monetary advantage index"**

L'indice de « monetary advantage index » (MAI) a suivi la même tendance que le LER (tableau 3.3). Les valeurs de MAI ont été positives dans le système de cultures intercalaires de maïs et de soja (tableau 3.3), ce qui montre un avantage de rendement défini par rapport aux autres systèmes intercalaires testés dans cette étude. En particulier, les valeurs de MAI positives les plus élevées concernaient le soja associé avec Mudishi 3 (+922,92), 08SADVE1 (+917,03) et ZM523 (+913,41). Le bénéfice monétaire le plus bas a été enregistré dans l'association Samaru-soja (+353,38). Les autres cultures intercalaires avec le niébé ont montré des valeurs négatives de MAI, à l'exception de 07SADVE-niébé (+542,65) et Samaru-niébé (+404,19). De même, l'IA, qui est également un indicateur de la faisabilité économique des systèmes de cultures intercalaires, a indiqué que l'association la plus avantageuse était uniquement pour le maïs dans l'association Mudishi 3-soja (+4,11). Le fait que les valeurs de MAI et IA étaient positives indique que ces systèmes de cultures intercalaires avaient l'avantage économique le plus élevé, alors que toutes les autres associations, qui présentaient des valeurs négatives, présentaient un désavantage économique. Ces résultats étaient également en accord avec les résultats de LER et les autres indices de concurrence (tableaux 3.1 et 3.2). De même, Ghosh (2004) a constaté que lorsque le LER et K sont plus élevés, il existe également un avantage économique significatif exprimé avec des valeurs plus élevées de MAI.

Les différences trouvées entre les associations dans cette étude peuvent être attribuées à l'agressivité du maïs et à d'autres facteurs tels que la morphologie, la physiologie et les différentes exigences pour les nutriments. En particulier, le maïs croissant en association avec le niébé peut affecter la fixation de l'azote en raison de la réduction de l'interception lumineuse du niébé due à l'ombrage par le maïs. Cela peut entraîner une mauvaise nodulation, une croissance et une capacité concurrentielle du niébé par rapport au soja dans ces associations. En outre, les avantages des systèmes de cultures intercalaires trouvés dans cette étude peuvent être attribués à une meilleure utilisation des ressources de croissance (Ofori et Stern, 1987). Par exemple, Osunde *et al.* (2004) ont constaté que sans addition d'engrais, la proportion de N dérivée de la fixation de N<sub>2</sub> était d'environ 40% dans le soja en association et 30% dans la

monoculture, et avec une application de 40 kg N ha<sup>-1</sup> N<sub>2</sub>-fixée par le soja en monoculture était significativement plus élevé que celui fixé par celui-ci en culture intercalaire. Cependant, pour connaître les causes réelles de ces différences entre les associations examinées dans cette étude, de nouvelles recherches sont nécessaires pour étudier ces facteurs.

**Tableau 3.3. Indices des avantages monétaires des cultures en association**

Variétés	Traitements	AYL			IA			MAI
		Maïs	Légumineuses	Total	Maïs	Légumineuses	Total	
07 SADVE	niébé	-0,24 ab	-0,37	-0,61 abc	-240,25 b	-559,56	-799,81 abc	542,65 b
08 SADVE 1	niébé	-0,43 abc	-0,88	-1,30 c	-428,30 b	-1314,39	-1742,69 c	-396,14 b
09 SADVE F2	niébé	-0,37 abc	-0,74	-1,11 abc	-370,79 b	-1108,23	-1479,05 abc	-443,62 b
Mudishi 1	niébé	-0,69 c	-0,62	-1,31 c	-687,57 b	-933,85	-1621,43 bc	-315,78 b
Mudishi 3	niébé	-0,39 abc	-0,84	-1,23 bc	-390,83 b	-1255,86	-1646,69 bc	-396,60 b
Samaru	niébé	-0,27 abc	-0,34	-0,61 abc	-270,12 b	-515,30	-785,42	404,19 b
VPO 538	niébé	-0,54 bc	-0,69	-1,22 bc	-539,69 b	-1027,95	-1567,64 abc	-205,75 b
ZM 523	niébé	-0,39 abc	-0,44	-0,84 abc	-391,47 b	-667,36	-1058,84 abc	-45,94 b
07 SADVE	soja	-0,16 ab	-0,62	-0,78 abc	-159,21 a	-924,43	-1083,63 abc	353,93 a
08 SADVE 1	soja	0,0028 a	-0,33	-0,34 a	-2,76 a	-500,99	-503,76	917,03 a
09 SADVE F2	soja	-0,02 a	-0,42	-0,44 ab	-24,63 a	-628,57	-653,19 ab	752,41 a
Mudishi 1	soja	-0,11 ab	-0,41	-0,52abc	-107,29 a	-620,89	-728,17 abc	742,39 a
Mudishi 3	soja	0,0041 a	-0,46	-0,45 ab	4,11 a	-686,30	-682,18 abc	922,92 a
Samaru	soja	-0,27 abc	-0,54	-0,81 abc	-265,78 a	-817,41	-1083,19 abc	353,38 a
VPO 538	soja	-0,10 ab	-0,44	-0,55 abc	-104,23 a	-663,66	-767,88 abc	694,48 a
ZM 523	soja	-0,04 ab	-0,43	-0,47 ab	-39,89 a	-645,7	-685,59 abc	913,41 a
Effet variétés		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Effet traitements		***	†	**	***	†	**	***
Effet variétés x traitements		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*'; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*'; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*'; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '†'; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = 'ns'.

### 3.3.5. Analyses en Composante Principale

La figure 3.2 montre les valeurs propres des composantes principales et le pourcentage de variation accumulé. Seules les deux premières composantes ont une valeur propre supérieure à 1. Ces deux composantes fournissent à elles seules plus de 80,72% de variations totale.

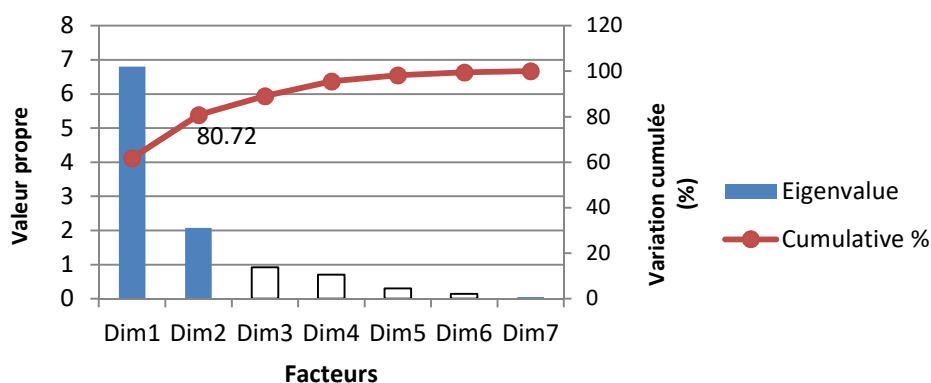


Figure 3.2: Screen plot montrant les variations cumulatives et valeur propres des facteurs

En nous référant aux résultats repris à la figure 3.3.a, on constate que la première dimension (Dim1) a mis en opposition le système de culture d'association en intercalaire maïs-soja, étant caractérisée par les indices LER, Am, Aleg, CRm, CRleg, ATER, MEY, MAI, AYL et IA, avec le système de culture d'association en intercalaire maïs-niébé, qui est caractérisé par l'indice Aleg. Quand à la deuxième dimension (Dim2), elle oppose les systèmes de culture d'association en intercalaire en fonction de leurs compétitivités (Figure 3.3.b). Cette dimension est caractérisée par deux groupes des variétés de maïs, ceux qui ont été plus compétitifs (09SADVE F2, 08SADVE1 et Mudishi3) et celui qui a été moins compétitif (Mudishi1).

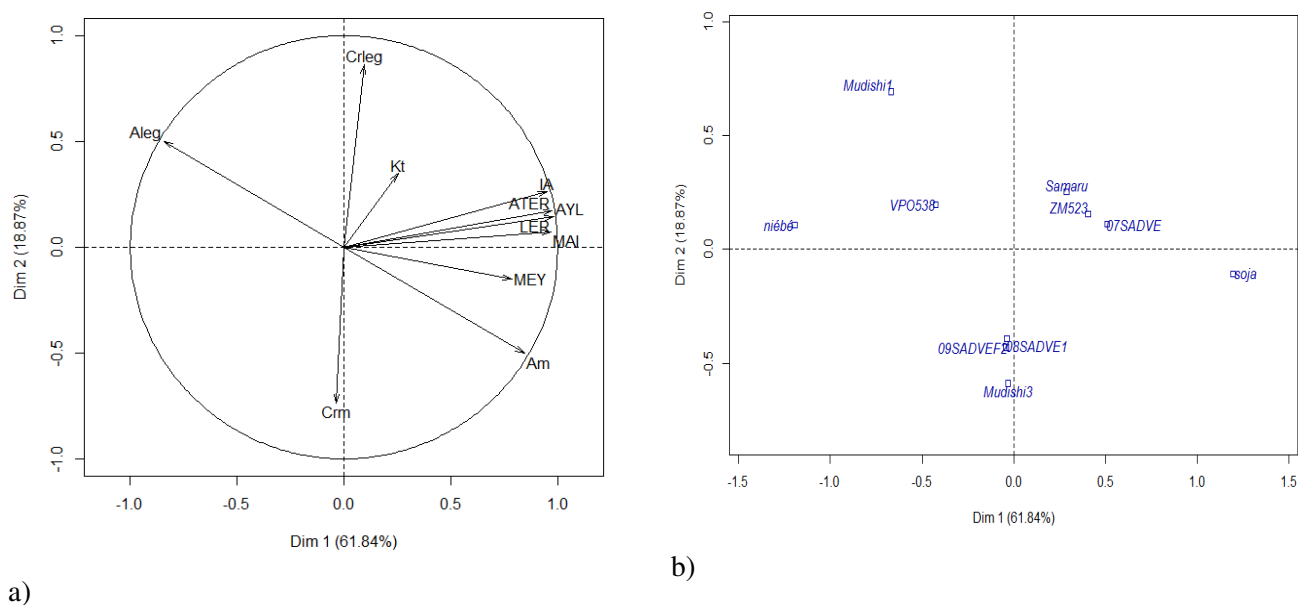


Figure 3.3 : a) Projection plane des variables générées par l'ACP des paramètres étudiés ; b) Distribution des variétés générée par les axes Dim 1 et Dim 2 selon l'ACP des paramètres étudiés.

D'autre part, le système de culture associations avec le maïs et le soja ont eu des avantages significatifs, comme le confirme les valeurs économiques (MAI) et d'efficacité de l'utilisation des terres (LER). La variété Mudishi 3 a montré une plus grande agressivité sur le niébé et une plus faible agressivité sur le soja. Mudishi3-soja a présenté le plus grand avantage monétaire, bien que l'indice IA soit négatif.

### **3.4. Conclusion**

La présente étude conclut que la culture intercalaire du maïs avec le niébé et le soja peut affecter le rendement en grains, la concurrence entre les 2 espèces (maïs et légumineuses) et la valeur économique des associations par rapport à la monoculture de la même espèce. Indépendamment des différentes variétés, les cultures intercalaires de maïs-niébé ou de maïs-soja avaient les avantages de rendement de la culture intercalaire et l'utilisation optimale des ressources environnementales par opposition à d'autres systèmes de cultures intercalaires. En outre, ces deux systèmes de cultures intercalaires ont été observés comme les plus rentables, bien que le niébé intercalé au maïs fût plus compétitif que le soja. En général, le maïs était l'espèce dominante dans toutes les associations de part sa nature. Bien que les légumineuses aient obtenu un faible rendement en association, elles étaient plus chères sur les marchés, et la monoculture de maïs n'atteindrait pas le niveau rentable gagné avec le système de culture intercalaire maïs-légumineuse. Un tel système peut être facilement pratiqué en particulier par les paysans de la région de basse altitude au Sud-Ouest de la RD Congo, ainsi que dans d'autres pays qui ont un climat tropical humide similaire. Par conséquent, un revenu socio-économique plus élevé pour le système agricole, ainsi que la conservation des sols peuvent être obtenus dans de tels environnements.

## **Chapitre 4 : Simulation de l'effet des différents arrangements spatiaux sur la dynamique foliaire du maïs mis en association avec le soja.**

### **4.1. Introduction**

La culture intercalaire est pratiquée depuis longtemps par les petits agriculteurs des tropiques. En particulier, la culture intercalaire de céréales et de légumineuses est reconnue comme un système de culture commun dans les pays tropicaux en développement (Ofori et Stern, 1987). Les cultures céréalières en C4 telles que le maïs (*Zea mays* L.), le mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) et le sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) sont les espèces végétales dominantes, tandis que les cultures de légumineuses C3 comme le haricot commun (*Phaseolus vulgaris* L.), niébé [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.], Arachide (*Arachis hypogaea* L.), pois cajan (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) et le soja (*Glycine max* (L.) Merr.) sont les espèces associées ou secondaires (Tsubo *et al.*, 2005). La structure de la canopée et les systèmes d'enracinement des cultures céréalières sont généralement différentes de celles des légumineuses. Dans la plupart des cultures intercalaires céréales– légumineuses, les cultures céréalières ont la structure de la canopée plus élevée que les cultures de légumineuses, et les racines des cultures céréalières poussent plus en profondeur que celles des cultures de légumineuses (Willey, 1990, Tsubo *et al.*, 2005).

Ceci suggère que les cultures composantes aient probablement une utilisation spatiale et temporelle différente de ressources environnementales. Les cultures associées peuvent utiliser des ressources environnementales telles que les radiations, l'eau et nutriments plus efficacement que les monocultures (Willey, 1990). La productivité de ces cultures dépend principalement de la quantité des radiations interceptées par les cultures lorsque d'autres facteurs, tels que l'eau, les nutriments, les maladies et les mauvaises herbes ne sont pas limitant (Loomis et Williams, 1963). Beaucoup d'études ont montré une corrélation positive de la production agricole à la quantité d'énergie radiante interceptée par le culture (Monteith, 1977; Tsubo *et al.*, 2001). Par rapport avec la monoculture, la culture intercalaire a un important potentiel de capture de rayonnement et l'utilisation en raison de l'effet de la combinaison d'utilisation spatio-temporelle différente de rayonnement parmi les cultures composant (Willey, 1990).

Parmi les diverses grandeurs représentatives de l'état d'une culture, on cite l'indice de surface foliaire (LAI, abréviation du terme anglophone). L'indice de surface foliaire (LAI) est une



variable clé pour l'étude du fonctionnement des surfaces végétales car elle conditionne les échanges de carbone et d'eau avec l'atmosphère (Duthoit, 2006). Le LAI est aussi défini comme la surface de feuilles vertes par unité de surface de sol. C'est un indicateur pertinent du potentiel de croissance (Varlet *et al.*, 1989 ; Lufuluabo *et al.*, 2011 ; Lukombo *et al.*, 2013 ; Tshiabukole *et al.*, 2019) ou de l'état nutritionnel ou sanitaire de la culture. Le LAI est souvent une variable centrale dans les modèles de simulation des cultures (CERES (Jones et Kiriny, 1986) ; SUCROS (Spitters *et al.*, 1989) ; STICS (Brisson *et al.*, 1998), où il sert généralement à calculer l'interception du rayonnement efficace pour la photosynthèse et donc la production de matière sèche.

De nombreux modèles de culture ont été développés pour la production du système de monoculture (Jones *et al.*, 2003; Keating *et al.*, 2003; Van Ittersum *et al.*, 2003). Cependant, peu de modèles de culture satisfaisants simulent la polyculture en bande et /ou en intercalaire (Probert *et al.*, 1998; Baumann *et al.*, 2002; Berntsen *et al.*, 2004). Les agronomes n'attendent pas seulement de ces modèles la simulation et la prévision de résultats agronomiques (rendement, matière sèche sur pied, consommation en eau, etc.), mais ils souhaitent que ces modèles soient capables de les aider à interpréter ces résultats afin d'utiliser des techniques culturales appropriées.

Pour répondre à ces besoins cette étude s'est fixé comme objectif de développer une approche logistique et mathématique pour simuler la croissance du maïs et du soja en intercalaire et en bande prédisant la productivité des espèces prises en compte dans la production céréalière sous conditions de la savane du sud-ouest de la RD Congo.

## **4.2. Matériels et méthode**

### **4.2.1. Matériels**

Cette expérimentation a été conduite durant la période allant d'avril à août 2018, à la station de recherche de l'INERA/Mvuazi. L'essai a été exécuté sur un terrain non labouré et débarrassé de tout résidu couvrant le sol, par le semis en monoculture et en association (culture en bande et en intercalaire) d'une variété de maïs à haute teneur en protéine de qualité (maïs QPM variété Mudishi 3) et d'une variété de soja (Vuangi).

## 4.2.2. Méthode

### 4.2.2.1. Dispositif expérimental

L'essai a été installée au cours de la petite saison culturale du 10 avril au 05 août 2018 suivant un dispositif factoriel en split plot à 3 répétitions avec chacune 6 unités expérimentales de 4m x 3m pour les traitements de monoculture et d'association du maïs et soja. La variété de maïs a été semé, pour une densité de 4 plantes par m<sup>2</sup>, aux écartements de 1m x 0,25m pour la culture en intercalaire (pure et association) et 0,50m x 0,50m pour la culture en bande (pure et association). Par contre, le soja a été semé, pour une densité de 36 plantes par m<sup>2</sup>, aux écartements de 0,40m x 0,20m pour la culture en intercalaire (pure et association) et de 0,30m x 0,15m pour la culture en bande (pure et association) (Figure 4.1.).

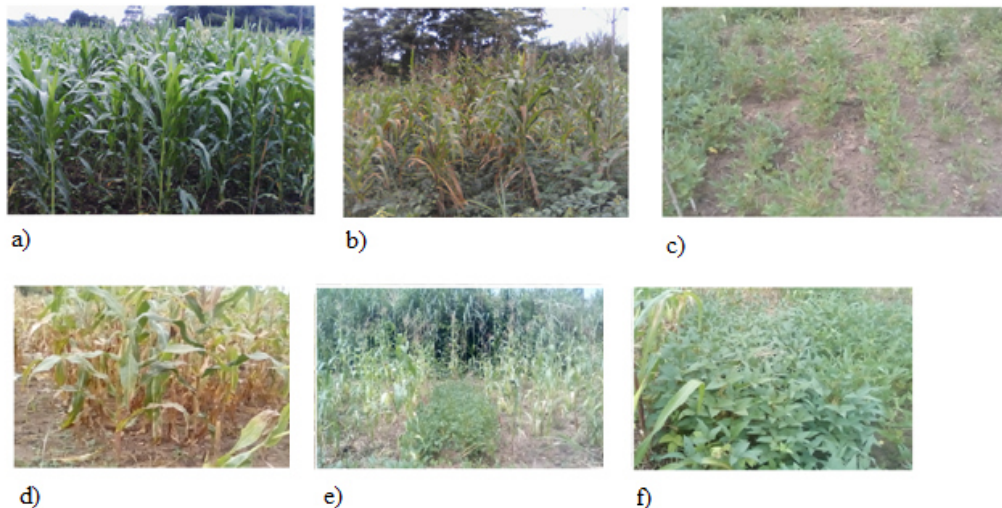


Figure 4.1. : a) monoculture de maïs avec arrangement (1,00 x 0,25) m en intercalaire ; b) maïs-soja en association intercalaire ; c) monoculture de soja avec arrangement (0,40 x 0,20) m en intercalaire ; d) monoculture de maïs avec arrangement (0,50 x 0,50) m en bande ; e) maïs-soja en bande d'association ; f) monoculture de soja avec arrangement (0,30 x 0,15) m en bande.

### 4.2.2.2. Collecte des données

Les paramètres observés sur le maïs et le soja au cours de l'expérimentation sont :

#### 4.2.2.2.1. En Phase de croissance

- La Hauteur de plant hebdomadaire (1 semaine après levée jusqu'à la récolte);
- Le diamètre au collet hebdomadaire (1 semaine après levée jusqu'à la récolte);

- La longueur et largeur des feuilles vertes hebdomadaire (1 semaine après levée jusqu'à la récolte) ;
- Le nombre de feuilles vertes visibles a été déterminé par le comptage des feuilles ayant de 50% de surface verte (à partir de 1 semaine après levée jusqu'à la récolte) ;
- Les précipitations et températures moyennes journalières durant toute la période expérimentale (figure 4.2).

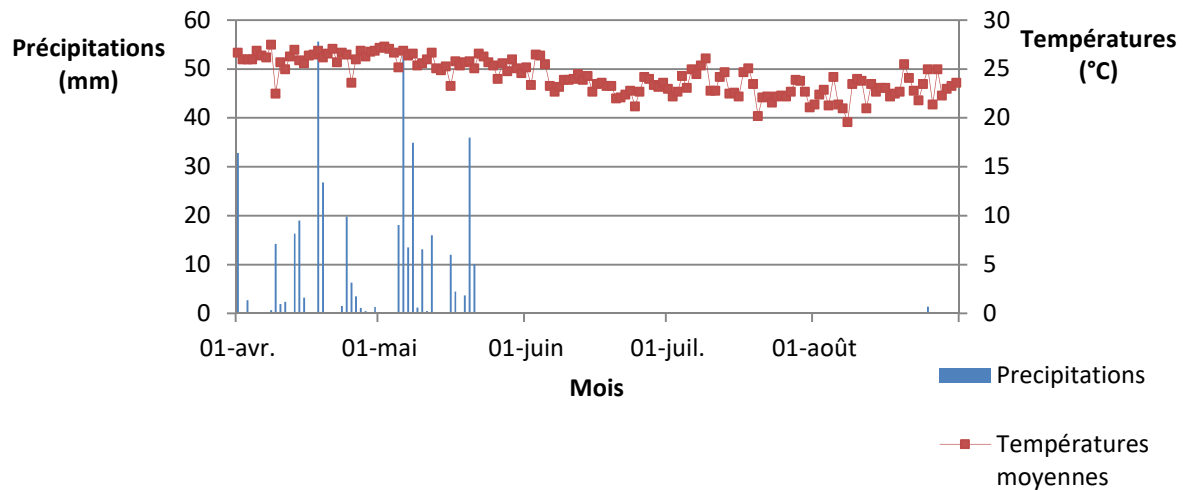


Figure 4.2. : Précipitations et températures moyennes journalières durant la période expérimentale d'avril à août 2018.

#### 4.2.2.2.2. A la récolte

- Le poids des épis de maïs au champ (à la récolte);
- Le poids des gousses de soja au champ (à la récolte) ;
- L'humidité au champ (à la récolte) :

#### 4.2.2.2.3. Rendement :

$$\text{Pour le maïs, Rendement} = \frac{PC}{1000} \times \frac{(100-HR)}{(100-HA)} \times Ri \times \frac{10000}{(SU \times 1000)} \quad (\text{Eq 4.1})$$

Où PC = poids des épis au champ

HR = humidité relative

HA = humidité atmosphérique

SU = Surface utile

Ri = rapport poids des grains sur poids des épis

$$\text{Pour le soja, Rendement} = \frac{PC \times 10000}{(SU \times 1000)} \quad (\text{Eq 4.2})$$

### 4.2.2.3. Indice de surface foliaire (LAI)

L'indice de surface foliaire (ISF, souvent noté LAI, *Leaf Area Index* en anglais) est le ratio de la surface totale supérieure des feuilles à la surface du sol sur laquelle la végétation se développe. Ce paramètre s'exprime en m<sup>2</sup> de feuilles par m<sup>2</sup> de sol et est donc sans dimension. L'indice foliaire d'une culture varie selon les types de culture et aussi au cours de leur développement ; il est souvent maximal près de la floraison et peut alors atteindre des valeurs importantes (4 à 8) (Bonhomme, 1994). C'est une grandeur qui varie en général de 0 pour le sol nu à 8 pour une forêt tempérée dense, pouvant dépasser 15 pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères (Schulze, 1982 ; Duthoit, 2006). Cette valeur très élevée du LAI se justifie par l'emploi d'anciennes méthodes de mesures et qui tendent à surestimer la valeur du LAI telle que définie par Chen et Black (1992). Il varie par exemple entre 2 à 6 pour des cultures annuelles (Beadle, 1993), et à 5,5 pour une grande culture saisonnière comme le maïs. Le LAI est un bon indicateur de la croissance et de la biomasse végétale, ainsi que de la densité d'un peuplement (Asrar *et al.*, 1984, Weiss, 1998). L'indice de la surface foliaire (LAI) a été estimé en multipliant la surface foliaire totale (m<sup>2</sup>) par la densité des plants par m<sup>2</sup>.

$$LAI = S_{Ft} \times d \quad (\text{Eq 4.3})$$

Avec  $S_{Ft}$  = surface foliaire totale et  $d$  = densité par m<sup>2</sup> de surface.

La surface foliaire totale du maïs et du soja peut être mesurée manuellement par la somme totale de la mesure de la surface foliaire d'une feuille individuelle ( $S_{fi}$ ).

$$S_{Ft} = \sum_{i=1}^n S_{fi} \quad (\text{Eq 4.4})$$

La surface foliaire individuelle ( $S_{fi}$ ) est mesurée à l'aide de la Méthode des dimensions linéaires de Duncan (Bennouna *et al.*, 2005 ; Mollier, 1999 ; Elings, 2000) :

$$SF = L_v \times l_m \times k \quad (\text{Eq.4.5})$$

Avec  $L_v$  = longueur visible,  $l_m$  = largeur maximale et  $k = 0,75$  pour les feuilles ligulées et  $0,50$  pour les feuilles non ligulées du maïs, ainsi que  $k = 0,50$  pour chaque lobe qui constitue les feuilles du soja.

#### 4.2.2.4. Calcul du temps thermique

En l'absence de stress hydrique, le développement foliaire est une simple fonction de la température. L'échelle de temps physiologique est basée sur la notion de somme de degrés-jour. Le temps thermique a été calculé suivant la formule proposée par Bennouna *et al.* (2005) :

$$T = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_b \text{ (Eq 4.6)}$$

Où Tmax et Tmin représentent respectivement la température maximale et minimale journalière de l'air, et Tb la température de base de la culture, en deçà de laquelle il n'y a pas croissance. Sa valeur pour le maïs est de 10°C (Bennouna *et al.*, 2005).

#### 4.2.2.5. Simulation de la hauteur de plant, du diamètre au collet et de l'expansion foliaire du maïs

La simulation de la hauteur de plant et du diamètre au collet ont été faite suivant l'équation logistique, sur base des estimations des paramètres du modèle tel que défini par Tshiabukole (2018) :

$$\text{Hauteur de plant} = \text{AsymH} \left[ \frac{1}{1 + e^{-\text{ScalH}(T_f - T_{iH})}} \right] \text{ (Eq 4.7)}$$

$$\text{Diamètre au collet} = \text{AsymD} \left[ \frac{1}{1 + e^{-\text{ScalD}(T_f - T_{iD})}} \right] \text{ (Eq 4.8)}$$

Avec :

- **AsymH ou AsymD** : paramètre donnant la réponse asymptotique de la hauteur de plant (H) ou du diamètre au collet (D) au fur et à mesure que le temps passe à l'infini. Il a les mêmes unités que la réponse.
- **ScalH ou ScalD** : paramètre d'échelle. C'est la valeur de T75% d'Asym-T50% de la hauteur de plant (H) ou du diamètre au collet (D). Ce paramètre a les mêmes unités que le temps variable.
- **Tf** : paramètre donnant le temps auquel toutes les feuilles sont sénescentes (arrêt de croissance de la plante).
- **TiH ou TiD** : paramètre donnant le temps de la hauteur de plant (H) ou du diamètre au collet (D) auquel la réponse atteint 50% d'Asym. Il a les mêmes unités que la variable explicative (temps).

Les estimations des paramètres du modèle ont été faites sur base des données collectées directement au champ.

La dynamique de croissance foliaire du maïs a été étudié suivant le modèle semi-mécaniste de Baret (1986) (Koetz *et al.*, 2005), dont l'équation est la suivante :

$$LAI = LAI_{Amp} * \left[ \frac{1}{1+e^{-b(T-T_i)}} - e^{-a(T-T_s)} \right] \text{ (Eq 4.9)}$$

L'équation de l'indice foliaire est décrite en deux parties, la croissance et la sénescence. La période de croissance est définie à l'aide de l'équation logistique, avec un paramètre **b** qui exprime le taux de croissance par rapport à **T<sub>i</sub>**, qui est cumul de temps thermique au point d'inflexion. La sénescence est déterminée au moyen d'une équation exponentielle, avec un paramètre **a** exprimant le rapport du taux de croissance et **T<sub>f</sub>**, le temps thermique exprimé en cumul des températures, où toutes les feuilles sont sénescentes. Le paramètre **LAI<sub>Amp</sub>** décrit l'amplitude maximale de l'indice de surface foliaire. La variable indépendante T représente l'accumulation des moyennes journalières de la température de l'air au dessus de 10°C (8°C pour le Modèle de Baret), à partir du semis.

Pour simuler la croissance et l'expansion foliaire du maïs, nous nous sommes basés sur les données enregistrées hebdomadairement (tous les 7 jours) à partir d'une semaine après la levée jusqu'à la hauteur maximale pour la taille et à la sénescence totale pour le LAI.

#### 4.2.2.6. Analyses statistiques des données

Les donnée collectées au champ ont été soumises à l'analyse de la variance suivant le modèle linéaire général (Anova Model<-aov (y~traitement+répétition) et au test de comparaison multiple de la plus petite différence significative (PPDS ou LSD en anglais) à l'aide du logiciel R 3.1.2. Pour simuler la hauteur de plant, nous avons utilisé la fonction getInitial et SSlogis du package de R, procédure d'estimation des paramètres Asym, T<sub>i</sub> et Scal. La fonction nls (Y~SSlogis (X, Asym, T<sub>i</sub>, Scal) du package de R est la procédure d'estimation des paramètres et de niveau de signification de la simulation. La régression non linéaire a été exécutée pour l'indice de surface foliaire « LAI » en utilisant la fonction nls du package de R qui est la procédure pour le paramétrage (a, b, LAI<sub>Amp</sub>, T<sub>i</sub>, T<sub>f</sub>). Le calcul de l'erreur standard et le niveau de signification

des paramètres ont été déterminés à  $p = 0,05$  (\*) ;  $0,01$  (\*\*) et  $0,001$  (\*\*\*) par le test de Student. Les différents modèles ont été évalués sur base des données observées et prévus théoriquement.

### **4.3. Résultats**

#### **4.3.1. Rendement en grains du maïs et du soja**

L'examen porté sur les données sur le rendement en grains de maïs n'a montré aucune différence significative entre les traitements, les arrangements et les interactions. La moyenne de rendement la plus élevée a été de  $1980,4$  kg/ha pour la monoculture de maïs avec arrangement d'intercalaire, et la plus basse a été de  $1687,71$  kg/ha pour l'association maïs-soja en bande (tableau 4.1 et 4.2).

Concernant le rendement en graines du soja, une différence significative a été observée ( $p < 0,05$ ) entre les traitements de soja en monoculture et le soja en association avec le maïs. La moyenne la plus élevée a été de  $1324,95$  kg pour la monoculture de soja en bande, et la moyenne la plus petite a été de  $290,67$  pour l'association soja maïs en bande. Tandis que pour les associations en intercalaire, la moyenne la plus élevée était de  $879,24$  kg pour la monoculture de soja, et la moyenne la plus petite était de  $496$  kg pour l'association soja avec maïs (tableau 4.3 et 4.4).

#### **4.3.2. Simulation de la hauteur du maïs**

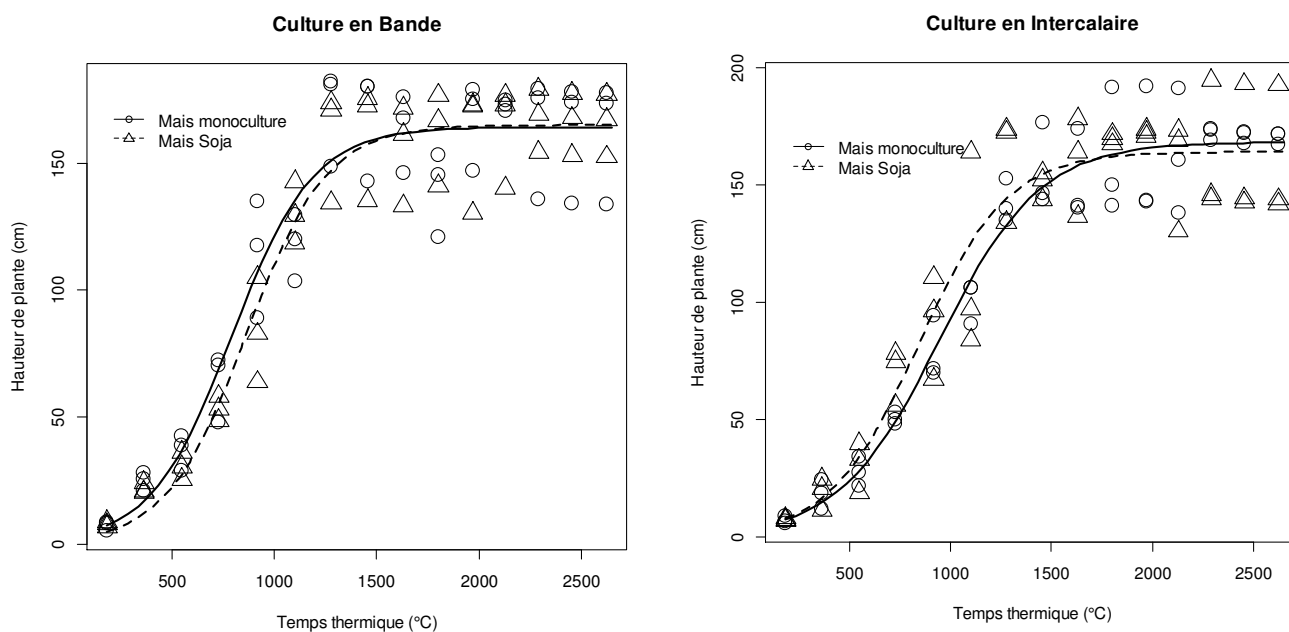
Les évolutions des hauteurs des plants dans chaque traitement et arrangement sont décrites dans la figure 4.3. Pour tous les modèles, les simulations ont montré des différences hautement significatives ( $p < 0,001$ ) dans les traitements de maïs en monoculture et de maïs avec soja en association (en bande et en intercalaire) pour tous les paramètres estimés ( $AsymH$ ,  $T_{iH}$ , et  $ScalH$ ).

Le tableau 4.1 présente les estimations des paramètres de simulation de la hauteur de maïs. En monoculture, le modèle a estimé la hauteur maximale à  $164,15$ cm et  $168,19$ cm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. Dans le même ordre, la moitié de la hauteur maximale ( $T_{iH}$ ) a été estimée à  $793,80^{\circ}CJ$  et  $946,66^{\circ}CJ$  après semis. En association, le modèle a estimé la hauteur maximale du maïs à  $165,02$  cm et  $164,14$  cm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire et la moitié de la hauteur a été estimée à  $863,75^{\circ}CJ$  et à  $842,47^{\circ}CJ$  après semis (tableau 4.1).

**Tableau 4.1. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du maïs en monoculture et en association pour la hauteur des plants.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle			Rendement en grains (kg/ha)
		AsymH (cm)	T <sub>iH</sub> (°CJ)	ScalH	
Bande	Maïs Monoculture	164,15***	793,80***	198,43***	1697,99
	Maïs-Soja	165,02***	863,75***	195,77***	1687,71
Intercalaire	Maïs Monoculture	168,19***	946,66***	248,09***	1980,4
	Maïs-Soja	164,14***	842,47***	219,31***	1737,71

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0.001 = '***'$  ;  $0.001 < \alpha < 0.01 = '**'$  ;  $0.01 < \alpha < 0.05 = '*'$  ;  $0.05 < \alpha < 0.1 = '†'$  ;  $0.1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .



*Figure 4.3. Evolution de la hauteur des plants de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association*



### 4.3.3. Diamètre au collet

Les évolutions du diamètre au collet dans chaque traitement et arrangement sont décrites dans la figure 4.4. Pour tous les modèles, les simulations ont été hautement significatives ( $p < 0,001$ ) dans les traitements de maïs en monoculture et de maïs avec soja en association (en bande et en intercalaire) pour tous les paramètres (AsymD,  $T_{ID}$ , et ScalD).

Dans le traitement de maïs en monoculture, le modèle estime le diamètre au collet maximale à 14,10mm et 14,50mm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. Dans le même ordre, la moitié du diamètre au collet a été estimée au temps thermique de 197,91°C et 89,79°C après semis (tableau 4.2.).

**Tableau 4.2. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du maïs en monoculture et en association pour le diamètre au collet.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle			Rendement (kg/ha)
		AsymD (mm)	$T_{ID}$ (°CJ)	ScalD	
Bande	Maïs Monoculture	14,10***	197,91***	101,56***	1697,99
	Maïs-Soja	13,34***	244,99***	97,18***	1687,71
Intercalaire	Maïs Monoculture	14,50***	302,11***	89,79***	1980,4
	Maïs-Soja	13,00***	278,64***	106,1***	1737,71

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0,001 = '***'$  ;  $0,001 < \alpha < 0,01 = '**'$  ;  $0,01 < \alpha < 0,05 = '*'$  ;  $0,05 < \alpha < 0,1 = '+'$  ;  $0,1 < \alpha < 1 = 'ns'$ .

Dans le traitement de maïs en association, le modèle estime le diamètre au collet maximal à 13,34 mm et 13mm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. Dans le même ordre, la moitié du diamètre au collet est estimée au temps thermique correspondant à 244,99°CJ et 278,64°CJ après semis (tableau 4.2.).

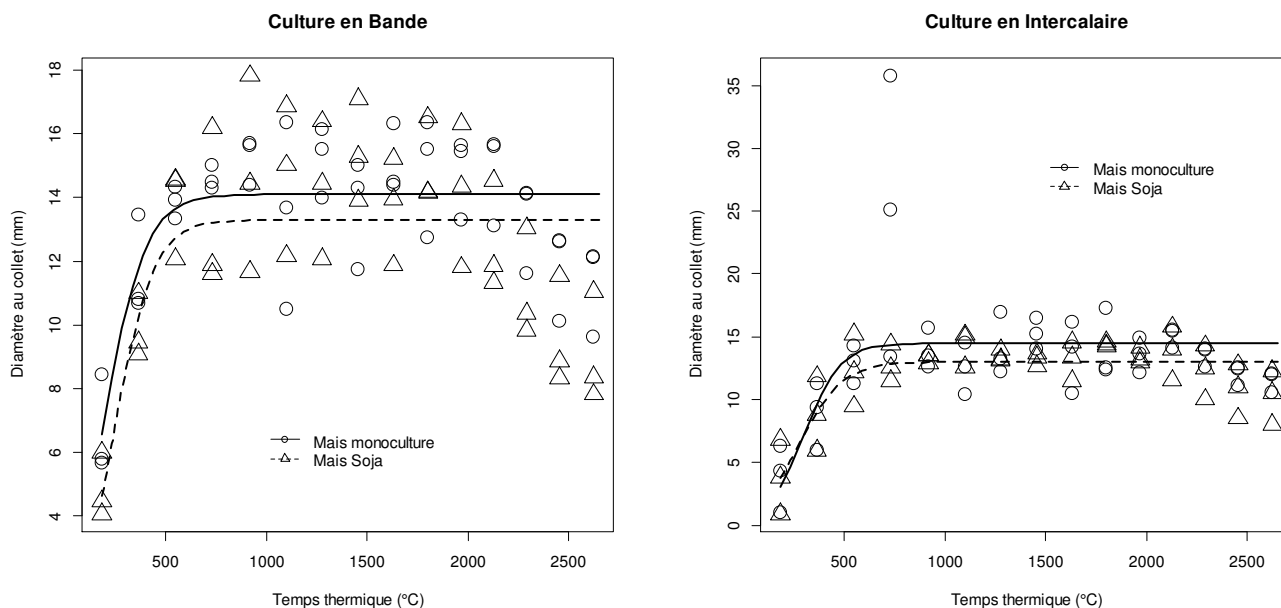


Figure 4.4. : Evolution du diamètre au collet de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association

#### 4.3.4. Simulation de la hauteur des plants du soja

Les évolutions de croissance des plants dans chaque traitement et arrangement sont décrites dans la figure 4.5. Pour tous les modèles, les simulations ont été hautement significatives ( $p < 0,001$ ) dans les traitements de soja en monoculture et de soja avec maïs en association (en bande et en intercalaire) pour tous les paramètres envisagés (AsymH,  $T_{iH}$ , et ScalH).

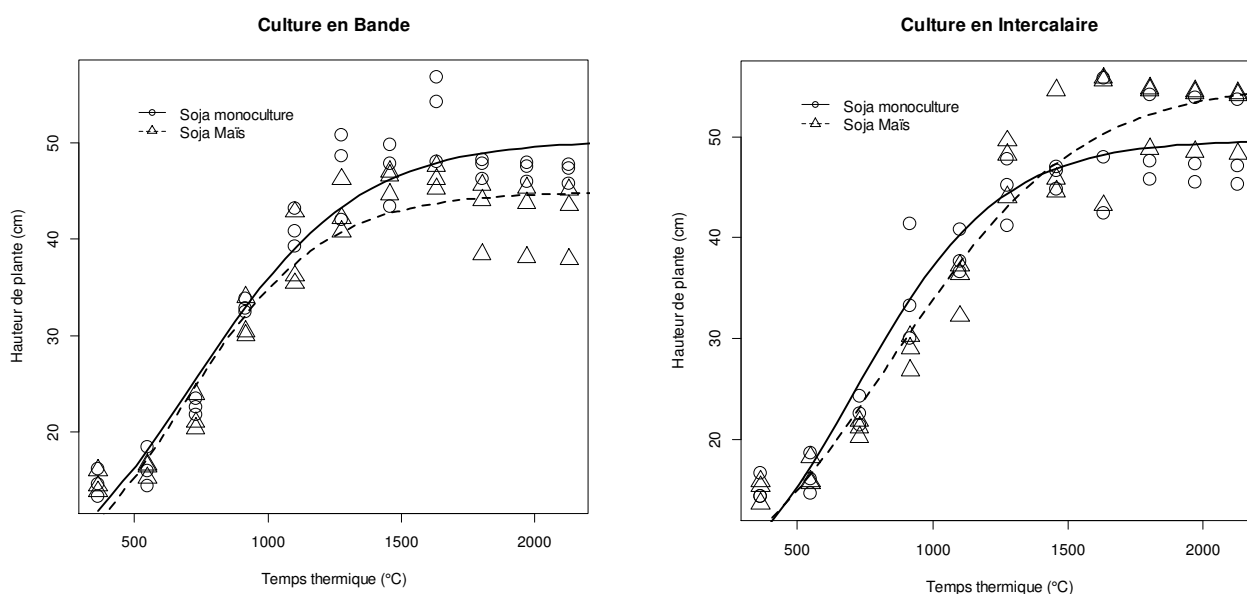
Dans le traitement de soja en monoculture, le modèle a estimé la hauteur maximale des plants à 50,32cm et 49,72cm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. Mêmement, la moitié de la hauteur a été estimée à 722,90°C et à 714,88°C après semis (tableau 4.3.).

**Tableau 4.3. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du soja en monoculture et en association pour la hauteur des plants.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle			
		AsymH (cm)	T <sub>iH</sub> (°CJ)	ScalH	Rendement (kg/ha)
Bande	Soja en monoculture	50,32***	722,90***	303,83***	1324,95 a
	Soja et Maïs	44,96***	674,14***	264,00***	290,67 b
Intercalaire	Soja en monoculture	49,72***	714,88***	264,78***	879,24 a
	Soja et Maïs	55,54***	845,76***	346,87***	496,00 b

Seuils de probabilité : 0 <math>\alpha</math> <math>0.001</math> = '\*\*\*'; 0.001 <math>\alpha</math> <math>0.01</math> = '\*\*'; 0.01 <math>\alpha</math> <math>0.05</math> = '\*'; 0.05 <math>\alpha</math> <math>0.1</math> = '†'; 0.1 <math>\alpha</math> <math>1</math> = 'ns'.

Pour soja en association avec le maïs, le modèle a estimé la hauteur maximale à 44,96cm et 55,54cm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. La moitié de la hauteur a été estimée au temps thermique de 674,14°CJ et 845,76°CJ après semis dans le même ordre d'arrangement (tableau 4.3.).



*Figure 4.5. : Evolution de la hauteur des plants de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association*

### 4.3.5. Simulation du diamètre au collet de soja

Les évolutions du diamètre au collet dans chaque traitement et arrangement sont décrites dans la figure 4.6. Dans le tableau 4.4, on a noté que les simulations des variables faites avec le modèle ont été hautement significatives ( $p < 0,001$ ) dans les traitements de soja en monoculture et de soja en association avec maïs en arrangement intercalaire pour tous les paramètres (AsymD,  $T_{ID}$ , et ScalD). Par contre pour l'arrangement en bande, les simulations ont été hautement significatives ( $p < 0,001$ ) dans les traitements de soja en monoculture et de soja en association avec maïs pour les paramètres AsymD et  $T_{ID}$ . Les simulations ont été également très significatives dans le traitement de soja en monoculture ( $p < 0,01$ ) et significatives dans le traitement de soja en association avec maïs ( $p < 0,05$ ) pour le paramètre Scal.

Le tableau 4.4 montre les estimations des paramètres du modèle pour le soja en monoculture et en association avec le maïs. Les estimations ont été hautement significatives à  $p < 0,001$  et très significatives à  $p < 0,01$ . Le modèle a estimé le diamètre au collet maximal à 4,96 mm et 5,16 mm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire pour la monoculture de soja. Dans le même ordre, la moitié du diamètre au collet a été estimée au temps thermique de 349,99°C et 352,71°C après semis. En association avec le maïs, le modèle estime le diamètre au collet maximal à 4,24 mm et 4,38 mm respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. Dans le même ordre, la moitié de la hauteur est estimée au temps thermique de 305,16°CJ et 270,26°CJ après semis.

**Tableau 4.4. : Estimation des paramètres du modèle pour les arrangements en bande et en intercalaire du soja en monoculture et en association pour le diamètre au collet.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle			Rendement (kg/ha)
		AsymD (mm)	$T_{ID}$ (°CJ)	ScalD	
Bande	Soja en monoculture	4,96***	349,99***	155,58**	1324,95 a
	Soja et Maïs	4,24***	305,16***	101,91*	290,67 b
Intercalaire	Soja en monoculture	5,16***	352,71***	149,23***	879,24 a
	Soja et Maïs	4,38***	270,26***	220,75***	496,00 b

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0,001 = '***'$  ;  $0,001 < \alpha < 0,01 = '**'$  ;  $0,01 < \alpha < 0,05 = '*'$  ;  $0,05 < \alpha < 0,1 = '+'$  ;  $0,1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .

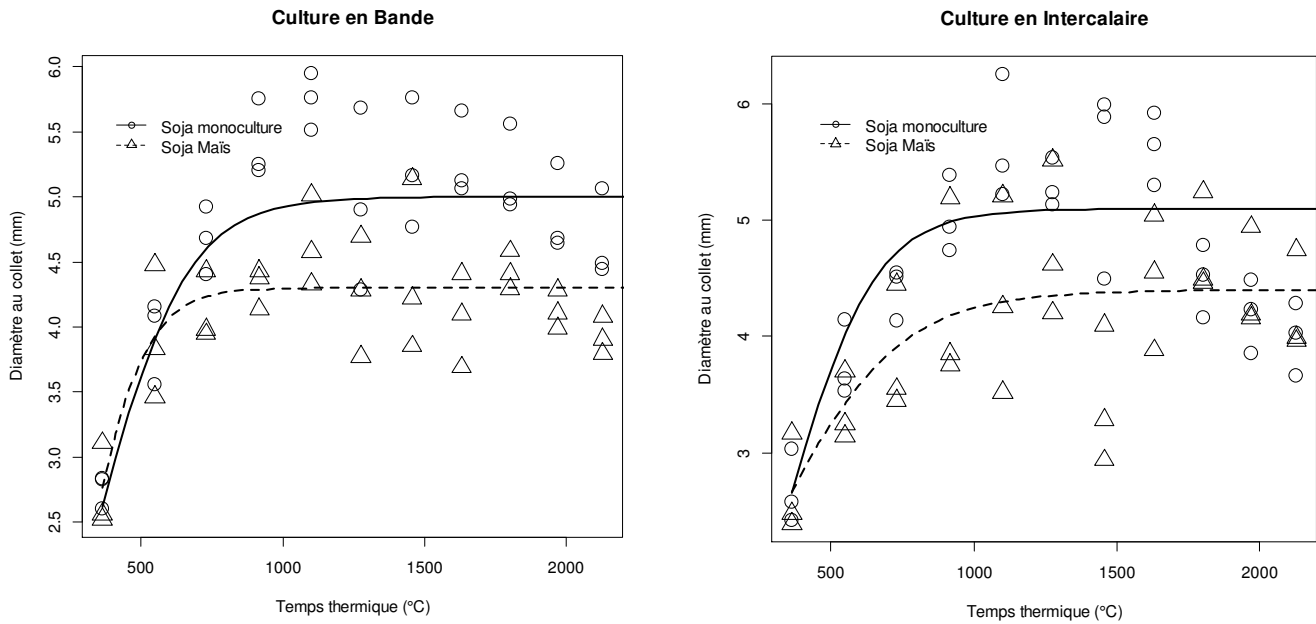


Figure 4.6. : Evolution du diamètre au collet de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association

### 4.3.6. Simulation de l'indice de surface foliaire (LAI)

#### 4.3.6.1. Simulation de l'indice de surface foliaire du maïs

L'estimation des différents paramètres basés sur le modèle STICS sont décrites dans le tableau 4.5. Le modèle a bien simulé les paramètres  $T_i$  et  $T_f$  dans l'association maïs-soja pour les deux arrangements. Dans la figure 4.7 on montre les évolutions des d'observations et des courbes de simulation des indices foliaires en bande et en intercalaire pour les traitements de maïs en monoculture et de maïs en association avec soja. Pour tous les modèles, les simulations sont significatives dans le traitement de maïs-soja en bande ( $p < 0,05$ ), hautement significatives en intercalaire ( $p < 0,001$ ) pour le paramètre  $T_i$ , et aussi hautement significatives dans tous les traitements (maïs en monoculture et en association) ( $p < 0,001$ ) pour le paramètre  $T_f$ .

**Tableau 4.5 : Estimation des paramètres du modèle pour les deux arrangements de maïs dans les traitements d'association et de monoculture.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle					Rendement (kg/ha)
		LAI <sub>Ampl</sub>	Ti	b	a	Tf	
	STICS	4,27	674	0,0012	0,0074	1657	
Bande	Maïs Monoculture	3,71	452	0,00331	0,000521	2459***	1697,99
	Maïs Soja	2,91	572**	0,003755	0,000684	2482***	1687,71
Intercalaire	Maïs Monoculture	3,62	591	0,0026	0,000573	2543***	1980,4
	Maïs Soja	2,21	564***	0,0042	0,00075	2546***	1737,71

Seuils de probabilité :  $0 < \alpha < 0.001 = '***'$  ;  $0.001 < \alpha < 0.01 = '**'$  ;  $0.01 < \alpha < 0.05 = '*'$  ;  $0.05 < \alpha < 0.1 = '+'$  ;  $0.1 < \alpha < 1 = 'ns'$  .

Au regard du tableau 4.5, pour la monoculture de maïs, les indices foliaires maxima (LAI<sub>Ampl</sub>) ont été estimés à 3,71 et 3,62 respectivement pour les arrangements en bande et en intercalaire. La moitié de ces indices foliaires maximale ont été atteints à 452°CJ et 591°CJ respectivement en bande et en intercalaire avec les rendements de 1697,99 kg/ha et 1980,4 kg/ha respectivement en bande et en intercalaire. Le temps thermique nécessaire pour boucler le cycle du maïs en monoculture a été de 2459°CJ en bande contre 2543°CJ en intercalaire. Les paramètres ont été également bien simulés pour le traitement du maïs en association avec le soja. Les amplitudes maximales des indices foliaires ont été estimées à 2,90 et 2,21 respectivement pour les arrangements en bande et en intercalaire. Les moitiés de ces indices foliaires ont été atteintes à 572°CJ en bande et 564°CJ en intercalaire avec les rendements de 1687,71kg/ha et 1737,021 kg/ha dans le même ordre respectif. Le temps thermique nécessaire pour boucler le cycle du maïs en monoculture a été de 2482°CJ en bande contre 2546°CJ en intercalaire.

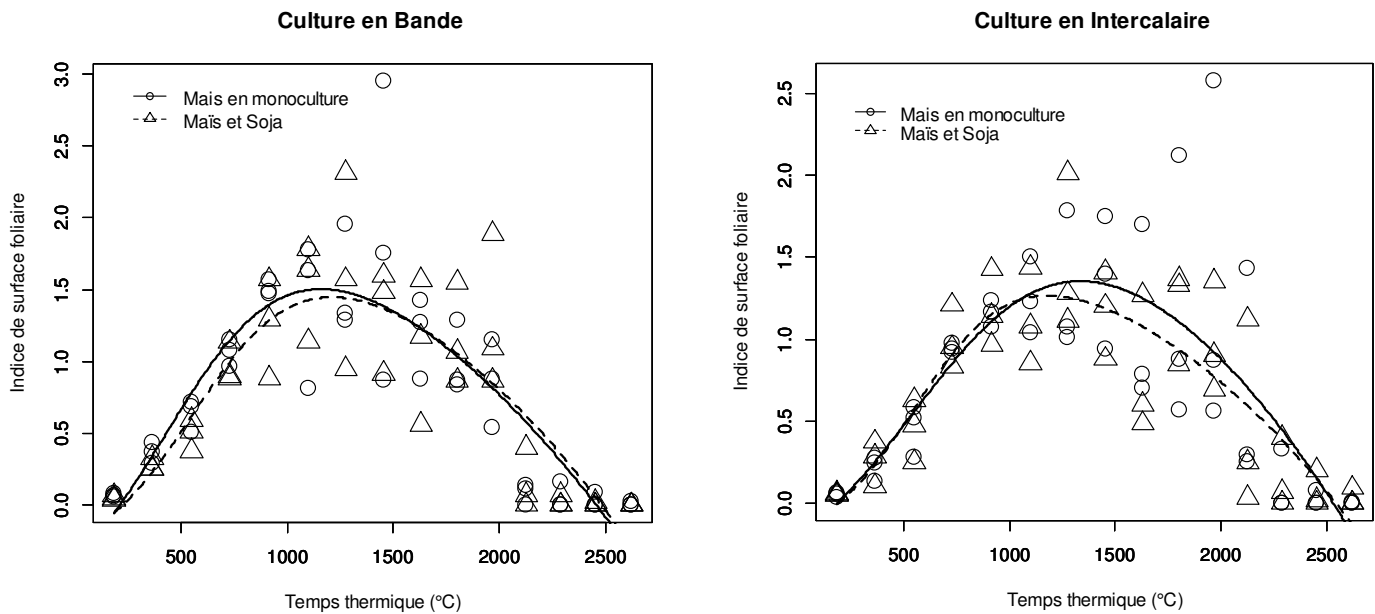


Figure 4.7. Simulation de l'indice foliaire de deux arrangements de maïs (bande et intercalaire) en monoculture et en association au temps thermique des conditions saisonnières.

#### 4.3.6.2. Simulation de l'indice de surface foliaire du soja

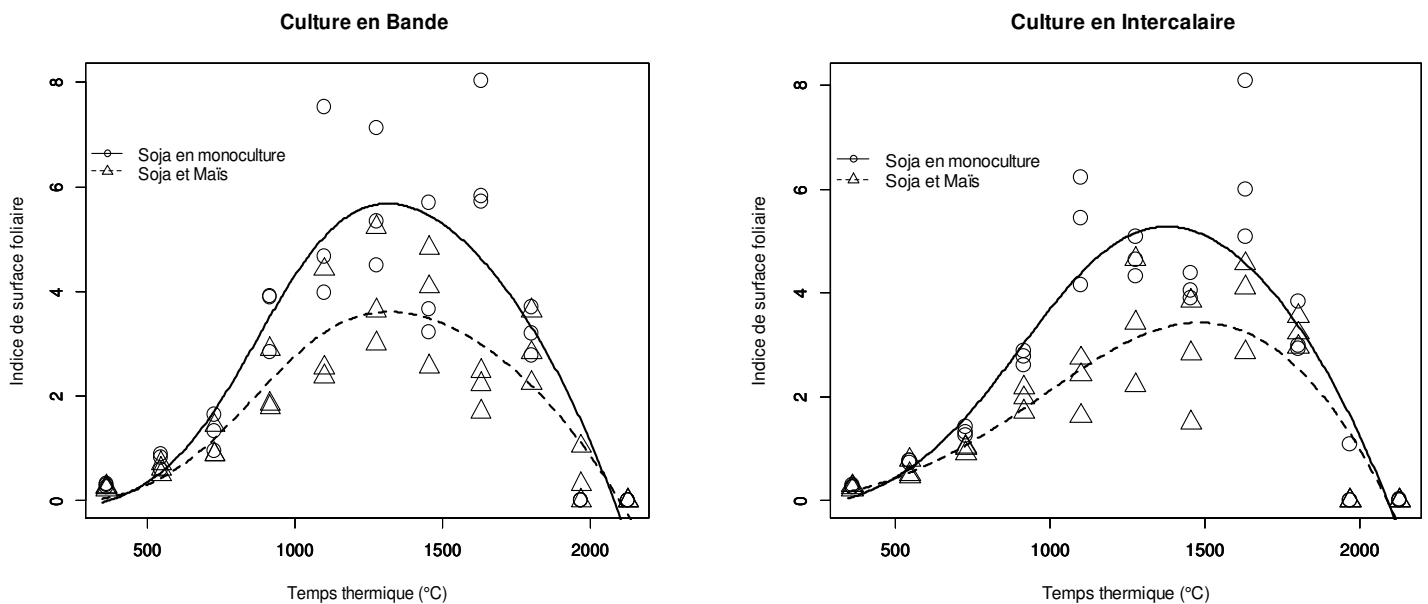
Le tableau 4.6 présente les estimations des différents paramètres basés sur le modèle STICS. Le modèle a bien simulé les paramètres thermiques  $T_i$  et  $T_f$  dans les traitements soja-maïs pour les deux arrangements. La figure 4.8 montre les évolutions d'observations aux champs et des courbes de simulation de l'indice foliaire en bande et en intercalaire pour les traitements de soja en monoculture et de soja en association avec maïs. Pour tous les modèles utilisés, les simulations sont hautement significatives dans les traitements de soja en monoculture et soja en association avec maïs, en bande et en intercalaire ( $p < 0,001$ ) pour les paramètres  $T_i$ , et  $T_f$ . Dans le traitement de soja en monoculture, l'indice foliaire maximale ( $LAI_{Ampl}$ ) a été estimé à 9,17 et 10,14 respectivement pour l'arrangement en bande et en intercalaire. La moitié de ces indices foliaires maximales ont été atteints à 894°CJ et 948°CJ respectivement en bande et en intercalaire avec les rendements de 1324,95kg/ha et 879,24 kg/ha respectivement en bande et en intercalaire. Le temps thermique nécessaire pour boucler le cycle du soja en monoculture a été de 2082°CJ en bande contre 2095°CJ en intercalaire.

Les paramètres ont été également bien simulés pour le traitement du soja en association avec le maïs; les amplitudes maximales des indices foliaires ont été estimées à 5,78 et 10,07 respectivement pour les arrangements en bande et en intercalaire avec les rendements dans le même ordre respectif de 290,67 et 496,00 kg/ha. La moitié de ces indices foliaires maximales ont été atteints à 887°CJ et 1138°CJ respectivement en bande et en intercalaire.

**Tableau 4.6. : Estimation des paramètres du modèle pour les deux arrangements de soja dans les traitements d'association et de monoculture.**

Arrangements	Traitements	Paramètres du modèle					Rendement (kg/ha)
		LAI <sub>Ampl</sub>	Ti	b	a	Tf	
	STICS	10,58					
Bande	Soja en monoculture	9,17	894***	0,00528	0,00165	2082***	1324,95 a
	Soja et Maïs	5,78	887***	0,00509	0,00165	2100***	290,67 b
Intercalaire	Soja en monoculture	10,14	948***	0,00419	0,00151	2095***	879,24 a
	Soja et Maïs	10,07	1138***	0,00280	0,00139	2138***	496,00 b

Seuils de probabilité : 0 <  $\alpha$  < 0.001 = '\*\*\*'; 0.001 <  $\alpha$  < 0.01 = '\*\*'; 0.01 <  $\alpha$  < 0.05 = '\*'; 0.05 <  $\alpha$  < 0.1 = '+'; 0.1 <  $\alpha$  < 1 = 'ns'.



*Figure 4.8. Simulation de l'indice foliaire de deux arrangements de soja (bande et intercalaire) en monoculture et en association au temps thermique des conditions saisonnières.*



## **4.4. Discussion**

### **4.4.1. Effet de l'association sur le rendement des cultures**

Bien que le rendement du maïs n'ait pas donné de différence significative entre tous les traitements, le rendement de la monoculture de maïs en intercalaire a été plus élevé que celui du maïs en monoculture en bande ainsi que le maïs en association avec le soja pour les deux arrangements (intercalaire et bande). Par contre, les différents types d'association ont eu un impact sur le rendement du soja qui s'est vu réduit de 43,59% en bande et de plus de 78,06% en intercalaire. Bien que la densité du soja dans les différentes associations soit restée la même (36 plants par m<sup>2</sup>), la meilleure combinaison d'espacement des lignes et de densité de peuplement [de soja] doit correspondre d'ordinaire à un indice de surface foliaire qui intercepte au moins 95% du rayonnement actif du point de vue de la photosynthèse au début de la phase de remplissage des graines (Boдрero *et al.*, 1989). Ce niveau d'interception de la lumière implique le contact des plantes situées sur des lignes voisines (le maïs), de façon à combler l'espace intermédiaire (Garcia, 2002). Des résultats similaires ont été trouvés par Mandal *et al.* (2014) pour l'association maïs-soja en intercalaire; plus le ratio maïs/soja augmentait, plus la compétition diminuait le rendement du soja. C'est le cas aussi pour d'autres légumineuses comme le niébé (Choudhary, 2014, Khonde *et al.*, 2018) ou le haricot (Kour *et al.* 2016 ; Adafre, 2016).

### **4.4.2. Simulation de la croissance des cultures**

La plus grande hauteur de plant de maïs a été enregistrée dans le traitement en monoculture avec les écartements en intercalaire et la plus petite hauteur de plant de maïs a été enregistrée en culture d'association maïs-soja avec les écartements en intercalaire. La valeur moyenne obtenue de hauteur de plant de la variété de maïs Mudishi3 approche légèrement celle obtenue par Tshiabukole *et al.* (2019) lors de la simulation de la croissance du maïs riche en protéine de qualité dans les conditions optimales de cultures. Par contre le diamètre au collet n'a pas subi de différences significatives entre tous les traitements, démontrant que le maïs avait maintenu sa vigueur malgré les variations de traitements.

D'après Salez (1988), la taille du maïs n'est jamais affectée par l'association avec une légumineuse, après qu'il ait enregistré sur tous ses essais effectués une différence de 0 à 6% (moyenne = 2%) de la hauteur et que la différence n'était pas significative entre les traitements de maïs en monoculture et en association avec les légumineuses à graines. Barker *et al.* (2006) ont signalé que la concurrence du maïs réduisait fortement LAImax et la hauteur des

légumineuses, mais que les légumineuses ne réduisaient la hauteur du maïs que jusqu'à 2%. Et comme plante de couverture, le soja a eu une plus grande hauteur dans le traitement d'association avec maïs en intercalaire et la plus petite hauteur de plant de soja a été enregistrée dans le traitement d'association avec le maïs en bande comme arrangement spatial. Cependant, le diamètre au collet du soja a été influencé par le traitement d'association avec maïs en bande et en intercalaire, démontrant une faible vigueur de plant de soja. Ces résultats peuvent être expliqués par le fait que la lumière étant l'un des facteurs cruciaux affectant la compétition dans la canopée mixte. L'interception et l'atténuation de la lumière dans le couvert végétal sont importants pour évaluer l'absorption potentielle de carbone par culture, et sont déterminées par la structure de la canopée (Vazin *et al.*, 2010 ; Sassenrath-Cole, 1995 ; Maddonni *et al.*, 2001). La hauteur de plante et le diamètre au collet sont parmi des variables informatives qui jouent un rôle clé dans l'évaluation de la compétition pour la lumière dans les plantes de couvertures (Lindquist *et Mortensen*, 1999). Hang *et al.* (1984) ou encore Stirling *et al.* (1990) ont également mis en évidence que la hauteur des plantes étaient accrue à la compétition pour la lumière alors que la biomasse par plante était réduite. A l'inverse, certaines espèces peuvent se trouver à des niveaux de compétition plus faible en association qu'en culture pure (Baldissera *et al.*, 2014).

#### **4.4.3. Simulation de l'indice de surface foliaire**

La production d'une culture dépend de l'interception des radiations solaires et de leur conversion en biomasse. La quantité de radiation incidente qui est interceptée par la plante est déterminée par la surface foliaire, l'orientation des feuilles et leur durée de vie. L'indice de surface foliaire du maïs a jusqu'à une valeur d'environ 4, une incidence positive sur l'interception des radiations ; au-delà, la surface additionnelle a peu d'effet sur l'interception de la lumière. La densité de plantation est un facteur déterminant du LAI (Abuzar *et al.*, 2011 ; Useni *et al.*, 2014).

Les plantes soumises à une plus forte compétition présentent une série de modifications caractéristiques d'un syndrome d'évitement de l'ombre. Les phénomènes d'ombrage se traduiraient au niveau des organes photosynthétiques par des feuilles plus fines, une diminution du poids spécifique des feuilles et une augmentation de l'indice foliaire (Crookston *et al.*, 1975 ; Tsubo *et al.*, 2001 ; Dong *et al.*, 2008).

Au regard de résultats obtenus dans cette étude, il ressort que les associations des cultures pour quelques soit les arrangements spatiaux, ont eu un effet négatif sur les légumineuses en ce qui

concerne l'expansion foliaire. Ceci confirme les conclusions de Willey, (1990) et Tsubo *et al.*, (2005) qui stipulaient que dans la plupart des cultures intercalaires céréales– légumineuses, les céréalières prennent de l'avantage sur les légumineuses du fait de la structure de la canopée plus élevée que les cultures de légumineuses, et les racines des cultures céréalières poussent plus en profondeur que celles des cultures de légumineuses.

Selon Loomis et Williams (1963) le rendement en grains est tributaire de l'interception de radiation par les cultures lorsque d'autres facteurs, tels que l'eau, les nutriments, les maladies et les mauvaises herbes ne sont pas limitant. Toute modification interne caractérisée par une position quelconque de la culture pour faire face aux radiations, influencerait la productivité de la culture. Les résultats obtenus dans cette étude vérifient les hypothèses émises par Loomis et Williams (1963) lesquelles peuvent être soutenues par les corrélations positives obtenues par Monteith, (1977) et Tsubo *et al.* (2001) pour la production agricole et la quantité d'énergie radiante interceptée par la culture.

#### **4.5. Conclusion**

Il ressort de cette étude que le partage de la lumière entre les espèces est un élément crucial du fonctionnement des associations de par l'implication de cette ressource dans de multiples processus. Les résultats obtenus ont montré qu'il ya eu une grande compétition pour la lumière dans les associations (plus précisément dans l'arrangement spatial en bande) par rapport aux monocultures, sur la plante de couverture qu'est le soja. Ce qui implique que l'interception du rayonnement par l'espèce dominante, le maïs dans notre cas, a eu un impact direct sur la qualité et la quantité de la lumière interceptée par l'espèce dominée qu'est le soja. La réduction de la quantité de lumière reçue par le soja a pu avoir des effets négatifs sur sa croissance et sur son rendement en grains du fait que la compétition pour la lumière a pu affecter aussi la fixation symbiotique de la légumineuse.

## Chapitre 5 : Discussion générale

Nos travaux expérimentaux menés pour cette thèse ont enrichi les connaissances scientifiques et techniques sur le fonctionnement des systèmes de culture d'association et de rotation dans un sol non travaillé, des cultures de rente prise en compte qui sont le maïs comme céréale ainsi que le niébé et le soja comme légumineuses en zone tropicale dans la savanne du sud-ouest de la RD Congo, précisément à l'INERA/Mvuazi. Le fait qu'il n'existe que très peu d'informations sur les SCV en RDC, cela a nécessité de proposer de nombreux dispositifs expérimentaux sur les SCV, à étudier dans les conditions agro-éco-climatiques de notre pays afin de proposer de nouveaux systèmes de culture pouvant répondre à une triple attente : la productivité agricole, la rentabilité économique et le respect de l'environnement. C'est dans ce cadre que s'étaient situés les objectifs de ce travail de thèse sur les systèmes de culture en semis direct sous couvert végétal (SCV), aux travers lesquels nous avons obtenu plusieurs résultats en rapport avec nos hypothèses.

Les résultats obtenus à partir du premier dispositif expérimental ont permis de valider les deux premières hypothèses de cette thèse. La première hypothèse repose sur le fait qu'une culture commerciale, comme le maïs, et qu'une plante de couverture commerciale, telle que le niébé et le soja, pourrait établir des relations qui ont un impact sur le rendement des cultures mis en association. L'intensité de ces relations varierait d'une culture associée à l'autre, selon l'espèce de légumineuse cultivée en couverture. Selon Violic (2002), les cultures multiples étant des systèmes agricoles anciens, la plupart des espèces et variétés utilisées ont été sélectionnées par les agriculteurs après plusieurs erreurs et essais. Il en fut de même pour la gestion nécessaire à la production de deux cultures ou plus dans le but de maximaliser l'utilisation des ressources tout en réduisant les risques et en sécurisant l'approvisionnement en aliments tout au long de l'année.

Dans le cadre de notre thèse, le premier objectif visait l'acquisition des connaissances sur la réponse de la culture du maïs en association et en rotation avec les légumineuses alimentaires utilisées comme plantes de couverture, dans le but de déterminer le type de couvert à utiliser en vue de mieux valoriser leurs effets sur le rendement du maïs et des légumineuses. Les résultats obtenus après expérimentation ont montré que l'association de différentes variétés de maïs avec les légumineuses (soja et niébé) ont eu des effets sur le nombre de plants des espèces cultivées, leurs biomasses ainsi que le rendement de chaque culture. Pour le nombre de plants des variétés

de maïs, il a été plus élevé en monoculture qu'en association, avec des performances pour les variétés Mudishi-1, Mudishi-3 et Samaru. Quant à la biomasse en épis vendables, on a observé une particularité pour la variété Mudishi-3 qui a produit plus de 73% de biomasse d'épis vendables dans tous les traitements. Pour la biomasse en épis non vendables, les pertes ont été observées plus en monoculture qu'en association des cultures. Concernant le rendement en grain de maïs, les résultats obtenus corroborent ceux des nombres de plants et de biomasse des épis. Ces résultats sont similaires à ceux présentés par Kasetsart (1989) dans des essais conduits sur la ferme de Suwan, en Thaïlande, où le rendement du maïs semé en monoculture dépassait de 31,9% le traitement maïs + soja.

Jeyakumaran et Seran, (2007) ont montré qu'une faible densité des plants par unité de surface avait entraîné une baisse de rendement. Le taux de semis de chaque culture dans l'association était ajusté en dessous de son taux maximal pour optimiser la densité des plants. Si le taux maximal de chaque culture était utilisé, on n'obtiendrait pas un bon rendement à cause de la surpopulation. Seran et Brintha, (2010) ont rapporté qu'en réduisant les taux de semis, les cultures ont une chance de bien produire au sein de l'association. Et le défi reste de savoir de combien peut-on réduire ce taux de semis sans compromettre la récolte. Selon Agboola et Fayemi (1971), l'arrangement spatial de maïs et de légumineuses (cultures intercalaires ou de culture de maïs après la récolte des légumineuses) n'affecte pas le rendement du maïs. Ainsi, Xiaolei et Zhifeng, (2002) signalent qu'un indice raisonnable de surface foliaire (LAI) est essentiel pour maintenir le taux de photosynthèse élevé ainsi que le rendement.

Pour les légumineuses, l'association des cultures n'a pas d'effets positifs sur le nombre de plant et la biomasse des graines non-comestibles ; mais les différents traitements ont eu des effets sur la biomasse des graines comestibles, avec un taux plus élevé qui a été observé avec le soja en monoculture (47,44%) et en culture d'association (46,13%) ; par contre, le taux le plus faible a été observé en monoculture de niébé (5,5%) et en association (4,41%).

D'après Horwith, (1984); Reddy *et al.*, (1994) et Jensen *et al.*, (2003), le maïs et le niébé sont souvent plantés ensemble dans des cultures intercalaires et développent des systèmes racinaires qui explorent en même temps le même sol pour les ressources. Ainsi, Mongi *et al.* (1976) ont rapporté que la plantation du niébé simultanément avec le maïs donnait un meilleur rendement. Cependant Nel, (1975) et Connolly *et al.*, (2001) ont montré qu'il existe, tout de même, une compétition interspécifique au cours de la culture intercalaire entraînant un effet nocif sur une

des cultures d'une part et d'autre part, Prasad et Brook (2005) ont rapporté que l'augmentation de la densité des plants de maïs a un effet significatif, dans la culture d'association en intercalaire de maïs-soja, sur la capacité photosynthétique du soja (son indice foliaire), affectant ainsi le rendement du soja.

La moyenne des rendements en graines du soja en monoculture s'est révélée supérieure (1802,23kg/ha) à celle observée en association avec le maïs (809,31kg/ha) en général, avec l'association 08SADVE1-soja (932,37 kg/ha) en particulier. Cependant, la monoculture de niébé a produit un rendement moins satisfaisant (17,82 kg/ha) par rapport à l'association avec le maïs (48,39 kg/ha), bien que le rendement le plus élevé ait été obtenu dans l'association Samaru-niébé (96,14 kg/ha). Ces résultats ont été expliqués par Silwana et Lucas, (2002) selon que des différences dans les caractéristiques phénologiques et morphologiques des espèces cultivées dans une association peuvent conduire à une capture accrue des ressources limitant la croissance. Rao et Mathuva, (2000); Olufemi *et al.*, (2001) et Dapaah *et al.*, (2003) soutiennent aussi ces mêmes résultats qui conduisent à un plus grand potentiel dans l'acquisition des rendements totaux plus élevés que lorsque ces mêmes espèces sont mises en monoculture sur le même terrain.

Selon Shumba *et al.*, (1990); Kumwenda *et al.*, (1997) et Jeranyama *et al.*, (2000) une culture principale compétitive telle que le maïs peut réduire la croissance du niébé, et donc les taux de fixation biologique de l'azote (BNF) dans une culture intercalaire qui entraîne une réduction du rendement en matière sèche et des nodules fixateurs d'azote sur la légumineuse en raison de l'ombrage.

Les résultats de l'essai de rotation, obtenus en deuxième saison, ont montré que la rotation des variétés de maïs avec la monoculture de maïs et des légumineuses combinés avec leurs résidus sous forme de paillis avait un effet favorable sur le rendement du maïs. Cette hypothèse a été vérifiée par Woome *et al.*, (1994); Balasubramanian, (1999); Cho *et al.*, (2001) les systèmes de cultures innovants tel le semis direct couplés à une gestion efficace des résidus d'intersaison sont de plus en plus souvent adoptés pour éviter la dégradation des sols, mais aussi pour diminuer les pertes de nutriments dans les systèmes de cultures où le sol a été soumis à des labours de manière quasi permanente. Les résultats de ces travaux sont similaires à ceux rapportés par Tan *et al.*, (2002) ; Dunin, (2002) selon qu'il avait beaucoup d'avantages dans

l'utilisation de l'eau résiduelle par des cultures d'intersaison et des jachères naturelles jouant ainsi souvent le rôle d'un paillis résiduel et dans l'amélioration de la production.

Edmeades (1990) a rapporté des résultats similaires d'expérimentations en multi-locales aux champs au Ghana, qui montraient qu'en l'absence d'engrais, les rendements du maïs qui suivait un maïs chutaient significativement, mais que cette chute de rendement pouvait être complètement compensée par des apports en engrais ou par une culture de niébé, car les niébé améliorent le rendement du maïs par l'azote qu'ils fixent et par des améliorations non précisées des conditions du sol. Ces fortes variations seraient dues à l'amélioration de la fertilité du sol par l'effet de rotation de culture. Ce principe a été vérifié par De *et al.*, (1983), Kumar Rao *et al.*, (1983) qui ont rapporté les effets hautement bénéfiques des légumineuses à graines sur la teneur en azote des sols et sur le rendement en grains des céréales mises en rotation des cultures. Les travaux du CIPEA (1984) au Mali ont également montré que l'introduction du niébé dans la rotation a entraîné une augmentation de 60% des rendements en grains du mil, par rapport aux niveaux obtenus lors de la première année de culture. Comparativement aux résultats présentés dans le système de culture en association, la présence du paillis a nettement influencé le rendement en grain. Ces résultats montrent que, même à faibles doses de paillis (5cm d'épaisseur de résidus), un effet considérable peut être observé sur le comportement des plantes. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés par de Van Asten *et al.* (2007) et Yilmaz *et al.*, (2008). Selon Puckridge et French (1983), Thurston (1997), Dounias (2001), Capillon et Seguy (2002), ces phénomènes s'expliqueraient par le fait que le semis sous couvert végétal mort améliore davantage la fertilité des sols de culture et occasionne une bonne productivité des surfaces cultivées.

En outre, ce type d'agriculture abaisse les coûts de production en faisant économiser sur les intrants agricoles (surtout sur la main-d'œuvre, les carburants fossiles, l'irrigation, les engrais minéraux et les pesticides). Cependant, l'agriculture de conservation n'est pas une approche uniforme. Les méthodes employées pour mettre en pratique ces principes essentiels varient en fonction des cultures et des conditions locales. Dans le cadre de notre thèse, l'analyse économique des variétés de maïs mis en association a permis d'identifier les différentes variétés de maïs qui ont produit des valeurs plus élevées de revenus et de bénéfice net par rapport aux différentes monocultures, dues probablement aux rendements qui ont été obtenus dans chaque système. Le grand bénéfice qui a été produit dans l'association de maïs/soja comparé aux autres

systèmes pourrait être probablement le résultat du rendement et du prix élevés du soja comparativement au maïs.

Les cultures d'association ont gagné de l'intérêt en raison des avantages potentiels qu'elles offrent sur le rendement des cultures auxquelles elles sont associées, c'est à dire une meilleure utilisation des ressources impliquant l'augmentation des rendements des récoltes ainsi qu'une fiabilité au système croissant de saison en saison. Et pourtant, que ce soit dans une rotation ou une association, les légumineuses peuvent améliorer la fertilité des sols, en produisant des grains de qualité, de ce fait, peuvent augmenter la productivité des cultures et augmenter le revenu brut en réduisant les charges en engrais notamment grâce à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Pour augmenter la place des légumineuses au niveau des exploitations agricoles, l'étude a expérimenté en station des associations maïs/soja maïs/niébé, sans modifier grandement le système de monoculture de maïs, en insérant les légumineuses dans des parcelles de maïs conduites avec les mêmes densités et les mêmes arrangements spatiaux qu'en cultures pures afin d'analyser les facteurs influant sur les performances des cultures associées; et de comparer la performance du maïs et des légumineuses cultivés en culture pure et en association de culture.

Les résultats obtenus de la première expérimentation ont permis de vérifier aussi la deuxième hypothèse qui concerne les relations de compétition qui existe entre les espèces dans la culture mixte par rapport à l'implantation des cultures pures, pouvant être l'aspect principal affectant le rendement dans un SCV.

Pour ce faire, Banik *et al.*, (2000) ; Ghosh, (2004) ; Agegnehu *et al.*, (2006) ; Banik *et al.*, (2006) ; Dhima *et al.*, (2007) ont proposé un certain nombre d'indices pour évaluer la compatibilité des différents types d'associations céréales-légumineuses. En ayant considéré le maïs comme récolte principale et les légumineuses comme composantes des associations, Anuaneyulu *et al.*, (1982) a rapporté que le rendement du maïs de chaque parcelle a été converti, pour le système de culture mixte, en rendement équivalent du maïs ou MEY et était plus élevé dans le système d'association avec le soja comparé aux monocultures. Bien que les cultures pures de légumineuses ont maintenu leur supériorité sur le système de culture mixte seulement pour le soja, la même proportion (50% de soja et 50% de niébé) utilisée en monoculture mise en association, a augmenté les rendements en grains de chaque variété de maïs, mais a diminué



ceux du soja et augmenté celle du niébé. Le rendement total des cultures mixtes le plus élevé a été obtenu avec Mudishi3-soja (3108,89 kg.ha-1).

L'avantage de la culture intercalaire et l'effet de la concurrence entre les deux espèces utilisées dans un mélange ont été calculés en utilisant des indices de concurrence différents. Certains indices tels que Land Equivalent Ratio (LER), Area Time Equivalent Ratio (ATER), Relative Crowding Coefficient (RCC ou K), Competitive Ratio (CR), aggressivity (A), and monetary advantage (MA), ont été développés pour décrire la compétition et l'avantage économique possible dans une culture d'association (Hiebsch, 1980 ; Banik *et al.*, 2000 ; Ghosh, 2004 ; Midya *et al.*, 2005 ; Lithouragidis *et al.*, 2011). Comme pour ce travail, l'indice de Rapport de surface équivalente ou « Land Equivalent Ratio » (LER) a été utilisé comme premier critère par Willey et Osiru, (1972) et Willey (1979a,b) pour déterminer l'efficacité des associations et des cultures pures pour les légumineuses (soja et niébé) et la céréale (maïs). Les résultats ont montré qu'en général, le LER partiel du maïs était supérieur à 0,50 pour toutes les cultures intercalaires, ce qui indique qu'il y avait un avantage pour le maïs ; d'autre part, les valeurs moyennes de LER partiel de niébé étaient inférieures à 0,50, ce qui indique qu'il y avait un désavantage pour le niébé. Comme pour Chen *et al.*, (2004), le LER partiel du soja était supérieur à 0,50 pour toutes les cultures intercalaires, ce qui indique qu'il y avait un avantage pour le soja, à l'exception des cultures intercalaires avec 07SADVE et Samaru. LER a montré des influences positives sur la croissance et le rendement des cultures intercalaires de maïs et soja (LER > 1) avec la moyenne la plus élevée obtenue avec l'association 08SADVE 1-soja. Ces résultats conformes avec ceux de Mead et Willey, (1980) montrent des avantages de la culture intercalaire sur le système en monoculture pour ce qui est de l'utilisation de ressources environnementales pour la croissance des plantes. Des résultats similaires ont été trouvés par Chen *et al.*, (2004) pour les proportions des cultures mixtes de pois-orge, Hauggaard-Nielsen *et al.*, (2001a) pour le haricot-blé et Li *et al.*, (1999) pour le maïs-haricot.

Le second indice développé par Aasim, (2008) est le « area time equivalent ratio » (ATER), il fournit une comparaison plus réaliste des rendements avantageux dans l'association par rapport à la monoculture en termes de temps que prennent les différentes espèces dans les systèmes de culture mixte. Les valeurs d'ATER étaient inférieures aux valeurs de LER indiquant l'estimation excessive de l'utilisation des ressources en raison des variations importantes des

périodes de maturité des cultures dont le maïs qui est resté plus longtemps sur terrain puis a eu suffisamment de temps pour compenser la concurrence des légumineuses.

Le « Relative Crowding Coefficient » (RCC ou K) qui est une mesure de la dominance relative d'un excédent d'une espèce par rapport à l'autre dans une association. Bien que l'analyse statistique entre les valeurs K partielles des légumineuses et du maïs n'a pas donné de différence significative, il semble que le  $K_{\text{maïs}}$  soit plus élevé que le  $K_{\text{légumineuses}}$  dans le cas des associations maïs-niébé et maïs-soja, ce qui indique que le maïs est plus compétitif que sa culture associée, à l'exception du niébé en association avec 09SADVE F2, Samaru et ZM523, et le soja en association avec 07SADVE et 08SADVE1. Des résultats similaires ont été rapportés par Banik *et al.* (2000) dans les cultures intercalaires de pois chiches-blé et par Dhima *et al.* (2007) dans les cultures intercalaires de céréales-vetch. Banik *et al.*, (2000) ont montré que le K total était supérieur à 1 dans le cas de toutes les cultures intercalaires avec du niébé et du soja, ce qui indique un avantage de rendement à l'association. Cependant, dans l'association maïs-niébé (09SADVEF2 et MUDISHI 1) et maïs-soja (07SADVE et MUDISHI 1), le K total était inférieur à 1, ce qui indique qu'il y avait un désavantage de rendement comme ce fut le cas avec Willey *et Rao*, (1980) et Ghosh, (2004). Les valeurs K ont suivi une tendance similaire avec les valeurs de LER.

Les indices suivants sont ceux de l'agressivité (A) qui est employé pour déterminer le rapport concurrentiel entre deux récoltes utilisées dans la culture mixte, du rapport de compétition (CR) utilisé pour évaluer la concurrence entre les différentes espèces, ainsi que de la perte de rendement actuel (AYL) qui est la perte ou le gain proportionnelle du rendement des associations par rapport à la monoculture. Dans toutes les associations, les valeurs de  $A_{\text{maïs}}$  positives ont montré que le maïs était l'espèce dominante et que le maïs associé avait des CR plus élevés dans toutes les associations; cependant, le niébé avait des valeurs de CR supérieures à celles du soja avec les variétés 09SADVE F2 (98,63), Mudishi3 (57,96) et 08SADVE1 (56,22). Les résultats de CR corroborent également ceux de l'indice d'agressivité. Les valeurs de A et CR pour le niébé ont indiqué que le niébé était plus compétitif que le soja dans les associations avec le maïs. Selon Yilmaz *et al.* (2008), bien que l'augmentation du ratio de la céréale dans les associations ait augmenté la valeur de la compétitivité par rapport aux légumineuses, le double du ratio en soi pourrait commencer la concurrence entre les plants de maïs, ce qui a probablement entraîné une croissance plus faible et une baisse des valeurs de CR et  $A_{\text{maïs}}$ . Cela a également été confirmé par les valeurs de  $AYL_{\text{maïs}}$  négatives qui l'étaient que

lorsque le taux de maïs était le plus élevé. Cela est probablement dû au fait que la capacité de fixation de l'azote atmosphérique des légumineuses n'a pas compensé la croissance vigoureuse des céréales dans une certaine proportion. Particulièrement,  $AYL_{\text{maïs}}$  a eu une valeur positive et n'a été plus élevée que dans la culture intercalaire de Mudishi3-soja, mais cette augmentation a été d'un avantage de rendement de 0,41% par rapport à la monoculture. Ce qui a indiqué un avantage de rendement pour le maïs probablement en raison de l'effet positif du soja sur la variété Mudishi3 cultivée en intercalaires (Banik, 1996; Banik *et al.*, 2000). En prenant en compte les résultats obtenus par Banik *et al.* (2000), l'indice AYL a pu donner des informations plus précises que les autres indices sur la concurrence inter et intra-spécifique des cultures composantes et le comportement de chaque espèce impliquée dans les systèmes intercalaires. La quantification de la perte ou du gain de rendement en raison de la culture intercalaire avec d'autres espèces ou de la variation de la population de la plante n'a pu être obtenue par des LER partiels, alors que l'AYL partielle montre la perte ou le gain du rendement par son signe et sa valeur.

En ce qui concerne les indices des avantages monétaires, Ghosh (2004) a proposé l'indice de l'avantage monétaire (monetary advantage index ou MAI) et Banik *et al.* (2000) celui de l'avantage de l'association (Intercropping Advantage ou IA). Les valeurs de MAI ont été positives dans le système de cultures intercalaires de maïs et de soja, ce qui montre un avantage de rendement défini par rapport aux autres systèmes intercalaires testés dans cette étude. De même, l'IA, qui est également un indicateur de la faisabilité économique des systèmes de cultures intercalaires, a indiqué que l'association la plus avantageuse était uniquement pour le maïs dans l'association Mudishi3-soja. Le fait que les valeurs de MAI et IA étaient positives indique que ces systèmes de cultures intercalaires avaient l'avantage économique le plus élevé, alors que toutes les autres associations, qui présentaient des valeurs négatives, présentaient un désavantage économique. Ces résultats étaient également en accord avec les résultats de LER et les autres indices de concurrence. De même, Ghosh (2004) a constaté que lorsque le LER et K sont plus élevés, il existe également un avantage économique significatif exprimé avec des valeurs plus élevées de MAI.

Les différences trouvées entre les associations dans cette étude peuvent être attribuées à l'agressivité du maïs et à d'autres facteurs tels que la morphologie, la physiologie et les différentes exigences pour les nutriments. En particulier, le maïs croissant en association avec le niébé peut affecter la fixation de l'azote en raison de la réduction de l'interception des

radiations par le niébé due à l'ombrage provoqué par le maïs. Cela peut entraîner une mauvaise nodulation, une croissance et une capacité concurrentielle du niébé par rapport au soja dans ces associations. En outre, les avantages des systèmes de cultures intercalaires trouvés dans cette étude peuvent être attribués à une meilleure utilisation des ressources de croissance tel que démontré par Ofori et Stern, (1987).

La réussite d'une culture intercalaire nécessite plusieurs considérations avant et pendant la culture. Silwana et Lucas (2002) ont découvert que la culture intercalaire affecte la croissance végétative des cultures composantes; et Willey et Rao, 1981 ont montré que ces cultures composantes doivent tenir compte des ressources spatiales, temporelles et physiques. Selon Seran et Brintha, (2009) la culture intercalaire économiquement viable dépend en grande partie de l'adaptation du schéma de plantation et de la sélection de cultures compatibles.

La culture intercalaire céréales-légumineuses, le potentiel de fournir de l'azote dépend de la densité des cultures, des espèces cultivées, des nutriments et de l'interception lumineuse. La sélection de cultures compatibles et le choix de la combinaison de ces cultures sont vitaux et jouent un rôle essentiel dans les cultures intercalaires. La densité des plantes, l'ombrage et la compétition nutritionnelle entre les plantes réduisent le rendement de la monoculture. La concurrence végétale pourrait être minimisée non seulement par une disposition spatiale, mais aussi en choisissant les cultures les mieux adaptées pour exploiter les nutriments du sol et le rayonnement solaire. Selon Watiki *et al.*, (1993), ce dernier est l'une des principales ressources déterminant la croissance et le rendement des cultures composantes lorsqu'elles sont plantées simultanément et ensemble, en particulier lorsque d'autres ressources ne limitent pas la croissance des plantes. Par rapport avec la monoculture, Willey, (1990) a montré que la culture intercalaire a un important potentiel de capture de rayonnement et l'utilisation en raison de l'effet de la combinaison d'utilisation spatio-temporelle différente de rayonnement parmi les cultures composant. De ce fait, la complémentarité des espèces en culture intercalaire devrait s'exprimer au niveau de l'utilisation des différentes sources comme l'azote, mais également au niveau de l'utilisation de l'énergie lumineuse. Cette complémentarité se traduirait par une meilleure valorisation de l'énergie lumineuse sur l'ensemble du cycle comparativement aux cultures « pures », meilleure valorisation qui s'explique par une croissance décalée des deux espèces, par des architectures aériennes complémentaires qui permettent au système associé de mieux valoriser la ressource lumineuse dans l'espace à la fois verticalement et horizontalement.

A ces éléments s'ajoutent les différences de hauteur entre les couverts : le maïs étant plus haut que le soja.

Dès lors que l'optimisation de l'énergie lumineuse par une meilleure captation du rayonnement photosynthétiquement actif tout au long de la croissance des espèces peut être améliorée par l'utilisation d'espèces ayant des cycles de croissance différenciées et des architectures aériennes complémentaires. Nos résultats tendent à montrer que la complémentarité entre le maïs et le soja dépend fortement de la disponibilité en azote en lien avec la production de biomasse des deux espèces. Un travail complémentaire a donc été entrepris afin d'identifier les densités et arrangements spatiaux à prendre en compte, que ce soit en monoculture ou en culture d'association, et d'analyser les structures verticales et horizontales des couverts pour optimiser l'utilisation spatio-temporelle.

Pour répondre à la troisième hypothèse de notre étude, une approche expérimentale couplée à la modélisation a permis d'enrichir les connaissances sur le fonctionnement d'un système innovant basé sur l'insertion d'une plante de couverture dans le but d'améliorer les performances agronomiques et environnementales dans les conditions de semis direct sous couvert végétal (SCV) des cultures associées. Cette étude a été entreprise pour déterminer et évaluer un modèle simulant la croissance des plantes de maïs et de soja mis dans des conditions de semis en cultures mixtes de densité optimale et à différents arrangements spatiales. L'estimation des paramètres de simulation du modèle de STICS adapté pour différents arrangements spatiaux a permis de prédire la croissance et le rendement des espèces cultivées en association.

Comme nous l'avons démontré dans les expérimentations précédentes et selon Agboola *et* Fayemi (1971), l'arrangement spatial de maïs et de légumineuses (cultures intercalaires ou de culture de maïs après la récolte des légumineuses) n'a pas affecté le rendement du maïs. Par contre, les différents types d'association ont eu un impact sur le rendement du soja qui s'est vu réduit de 43,59% pour l'association en bande et de plus de 78,06% pour l'association en intercalaire.

D'après Monteith, (1977), la croissance des plantes et le partage de la biomasse résultent d'une forte interception du rayonnement actif photosynthétique (PAR), déterminant ainsi le taux d'accumulation de matière sèche dans les cultures. Bien que la densité du soja dans les différentes associations était restée la même, Bodrero *et al.*, (1989) ont trouvé que la meilleure combinaison d'espacement des lignes et de densité pour les légumineuses devrait correspondre

d'ordinaire à un indice de surface foliaire qui intercepte au moins 95% du rayonnement actif du point de vue de la photosynthèse au début de la phase de remplissage des graines. Garcia, (2002) explique qu'à un certain niveau d'interception de la lumière cela implique le contact des plantes situées sur des lignes voisines (le maïs), de façon à combler l'espace intermédiaire. Des résultats similaires ont été trouvés par Chatterjee et Reddy (1974), Patra *et al.* (1999) et Mandal *et al.* (2014) pour l'association en intercalaire maïs soja où plus le ratio entre le maïs et le soja a augmenté, plus la compétition n'a fait que baisser le rendement du soja. C'est le cas aussi pour d'autres légumineuses comme le niébé (Choudhary, 2014, Khonde *et al.*, 2018) ou le haricot (Kour *et al.* 2016 ; Adafre, 2016).

Cette étude a montré également que l'arrangement spatial pour une même densité de plant est important dans la performance d'un système. En effet, en conditions non fertilisées, le maïs qui a été semé en monoculture (en intercalaire et en bande) a permis d'obtenir une meilleure croissance de part la hauteur des plants et la vigueur du collet de la tige. Tandis que le maïs semé en association avec les mêmes arrangements ont permis d'obtenir une croissance moyenne en hauteur des plants et un faible diamètre au collet de la tige. D'après Salez (1988), la hauteur du maïs n'est jamais affectée par l'association avec une légumineuse, après qu'il ait enregistré sur tous les onze essais effectués, une différence de 0 à 6% (moyenne = 2%) de la hauteur, jamais significative. Violic, (2002) a montré qu'en Inde, les cultures intercalaires de légumineuses à graines comme le soja avec le maïs sont courantes et ne diminuent pas le rendement du maïs.

Par contre pour le soja, Garcia (2002) a énoncé que le diamètre au collet des tiges du soja diminue lorsque la densité de peuplement s'accroît, et ainsi la hauteur des plantes augmente. A travers les connaissances de l'effet de l'association maïs/soja sur les paramètres de croissance (la hauteur et le diamètre au collet) et le rendement des cultures. Selon Willey, (1979 a,b) et Baumann *et al.*, (2001), l'importance de l'arrangement spatial des cultures impliquées dans l'association culturale a été considéré pour le choix des cultures compatibles afin d'évaluer leur performance. Cela pourrait être attribué à la réduction de la compétition pour les ressources en monoculture comparativement en association, bien que les conditions pluviométriques fussent favorables durant la saison culturale. C'est pourquoi la tendance à la verse s'aggrave généralement en présence de forte densité en monoculture ou en intercalaire. Fukai et Trenbath, (1993) et Garcia, (2002) stipulent que la compétition entre les espèces varie selon la ressource considérée, la biologie des espèces et les itinéraires techniques choisis pour l'association culturale. De ce fait, le choix d'un itinéraire technique devrait permettre une optimisation du

système pour une meilleure complémentarité (minimisation de la concurrence entre espèces et augmentation de la concurrence contre les adventices) pour avoir une meilleure productivité totale supérieure à la somme de chacune d'entre elles cultivée séparément, car elles peuvent avoir des besoins de croissance différents. Baumann *et al.*, (2001) ; Violic, (2002) ; Mbaye *et al.*, (2014) et Hamd Alla *et al.*, (2014) ont montré que l'augmentation de la productivité par unité de surface pouvait constituer une raison importante pour cultiver deux ou plusieurs cultures ensemble.

Cette étude a aussi montré que la production d'une culture dépend de l'interception des radiations solaires et de leur conversion en biomasse. D'après Watiki *et al.*, 1993, le rayonnement solaire est l'une des principales ressources déterminant la croissance et le rendement des cultures composantes lorsqu'elles sont plantées simultanément et ensemble, en particulier lorsque d'autres ressources ne limitent pas la croissance des plantes. La quantité de radiation incidente qui est interceptée par la plante est déterminée par la surface foliaire, l'orientation des feuilles et leur durée de vie. Les plantes soumises à une plus forte compétition présentent une série de modifications caractéristiques d'un syndrome d'évitement de l'ombre. Crookston *et al.*, 1975 ; Tsubo *et al.*, 2001 ; Dong *et al.*, 2008 ont expliqué ces phénomènes d'ombrage se traduisant au niveau des organes photosynthétiques par des feuilles plus fines, une diminution du poids spécifique des feuilles et une augmentation de l'indice foliaire. L'indice de surface foliaire du maïs (ISF) ou Leaf area index en anglais (LAI) a jusqu'à une valeur d'environ 4 pour le maïs et de 10 pour le soja suivant le modèle STICS de Brisson *et al.*, (1998), et Xiaolei et Zhifeng, (2002) stipulent qu'une valeur raisonnable est essentielle pour maintenir des taux de photosynthèse et un rendement élevés.

Au regard de résultats obtenus dans cette étude, il ressort que les associations des cultures pour quelques soit les arrangements spatiaux, ont eu un effet négatif sur les légumineuses en ce qui concerne l'expansion foliaire. Ceci confirme les conclusions faites par Willey, (1990) et Tsubo *et al.*, (2005) qui stipulaient que dans la plupart des cultures intercalaires céréales-légumineuses, les céréalières prennent de l'avantage sur les légumineuses du fait de la structure de la canopée plus élevée que les cultures de légumineuses, et les racines des cultures céréalières poussent plus en profondeur que celles des cultures de légumineuses.

Lafitte, (2002) a montré que la densité de plantation est un facteur déterminant du LAI. Ainsi, Prasad et Brook (2005) ont également signalé que la densité du maïs avait un effet significatif sur le LAI, qui augmentait avec l'augmentation de la densité des plantes. Le LAI du maïs unique

ne différait pas significativement de celui du maïs cultivé avec du soja à la même densité, n'indiquant aucun effet par la présence de soja.

Selon Loomis et Williams (1963), le rendement en grains est tributaire de l'interception de radiation par les cultures lorsque d'autres facteurs, tels que l'eau, les nutriments, les maladies et les mauvaises herbes ne sont pas limitants. Toute modification interne caractérisée par une position quelconque de la culture pour faire face aux radiations, influencerait la productivité de la culture. Suivant les méthodologies de vérification des hypothèses de cette thèse, les résultats qui en sont issus sont similaires aux résultats obtenus par Loomis et Williams (1963). Elles peuvent être soutenues par les corrélations positives obtenues par Monteith, (1977) et Tsubo *et al.* (2001) pour la production agricole et la quantité d'énergie radiante interceptée par la culture. Le LAI du soja était le plus élevé à la densité de maïs la plus faible par rapport aux autres densités et il était toujours inférieur en culture intercalaire par rapport à la monoculture. Un LAI plus élevé entraîne une meilleure couverture du sol pour une moindre évaporation de l'eau du sol et une suppression des mauvaises herbes. Violic, (2002) a montré qu'en Chine continentale et Taiwan, province de Chine, les agriculteurs utilisent un grand nombre de modèles de cultures intercalaires en alternant fréquemment des lignes de plantes hautes (deux lignes de maïs) et de plantes basses (six lignes de soja) permettant ainsi le maximum de pénétration de la lumière et l'obtention « d'effets de bordure positifs » pour tout le maïs. Mais pour le soja, Minor, 1982 ; Dashiell et Gumisiriza, (1989) ont trouvé que l'implantation de peuplements optimaux s'avère généralement difficile dans les régions tropicales, en raison de l'utilisation de semences à faible capacité de germination et de vigueur insuffisante ou faute de conditions adaptées la production des semences et à leur stockage. Prasad et Brook (2005) ont rapporté que l'augmentation de la densité des plants de maïs a eu un effet significatif sur la LAI dans la culture intercalaire de maïs-soja. La meilleure combinaison d'espacement des lignes et de densité présentée par Garcia, (2002) ; Bodrero *et al.*, (1989), devra correspondre d'ordinaire à un indice de surface foliaire qui intercepte 95% du rayonnement actif, ce qui implique qu'à un certain niveau d'interception de la lumière, le contact des plantes de soja avec les lignes voisines de maïs doit permettre de combler l'espace intermédiaire pour maintenir une bonne photosynthèse.



## Chapitre 6 : Conclusion générale et perspectives

### 6.1. Conclusion

Pour rendre la production céréalière plus durable, il est préconisé de reconfigurer les systèmes de production agricole partout dans le monde pour favoriser une intensification durable. La recherche dans le domaine de l'Agriculture de Conservation, en général, et du Semis Direct Sous Couvert Végétal (SCV), en particulier, propose de nombreux défis aux agronomes et aux sélectionneurs, car les systèmes mettent en cause des interactions complexes entre espèces et génotypes à l'intérieur des espèces et entre espèces. Cela implique aussi de proposer une alternative au modèle productiviste de la révolution verte pour améliorer la sécurité alimentaire des ménages, leurs capacités d'adaptation aux changements climatiques et préserver les ressources agropastorales.

A ce jour, les recherches menées en Afrique sur ces systèmes de culture ont produit principalement des références techniques et biophysiques à l'échelle de la parcelle, sans étudier leurs interactions avec les autres composantes des systèmes de production. Dans le cadre de cette thèse, il a été présenté l'approche expérimentale et à la modélisation des cultures. La première approche a permis d'enrichir les connaissances sur la réponse et la rentabilité du maïs en culture mixte (association et en rotation) avec des légumineuses sur la base des principes de fonctionnement des SCV en Agriculture de Conservation, dans le but d'en déterminer la combinaison optimisant la production en grains et la biomasse totale du système. Tandis que la deuxième approche a permis de renforcer les connaissances sur le fonctionnement du système innovant par l'estimation des paramètres de simulation du modèle de Baret adapté au SCV pour la simulation de l'association de culture « maïs-soja » permettant une simulation correcte des interactions entre les deux espèces pour la lumière comme ressource.

Il ressort de cette étude que, premièrement, les effets résiduels des cultures des légumineuses (le niébé en particulier) ont accru considérablement le rendement du maïs et que la production des légumineuses mises en association avec le maïs s'est révélée plus performante pour le soja que pour le niébé. Tandis que la monoculture de maïs, produisant un paillis pauvre en nutriments, s'est révélé moins performante par rapport au paillis provenant des associations, occasionnant ainsi des pertes allant jusqu'à plus de 5%. Toutes les variétés de maïs ont présenté chacune une combinaison optimisant la productivité. Il s'est avéré que parmi toutes les huit

variétés prises en compte lors de l'expérimentation, les variétés 09SADVE F<sub>2</sub>, Mudishi1, Mudishi3, VPO538 et Zm523 ont doublé, triplé voir quadruplé leurs rendements lorsqu'elles sont mises en rotation avec le niébé. Ce qui a permis d'établir une pré-sélection des meilleures variétés pour ces différentes associations et rotations ainsi que ceux qui ont occasionné des bénéfices importants en augmentant leurs ratios que se soit en culture d'association ou en rotation par la suppression du labour et l'impact de ces systèmes sur les adventices réduisent fortement les temps de travaux au champ de plus de la moitié.

Le choix et l'amélioration variétale des plantes de couverture considérées se font en fonction des effets attendus. Ils prennent en compte le type de système racinaire et sa puissance non seulement pour leur contribution à l'enrichissement organique du sol, mais aussi pour leur capacité à remonter et à recycler les éléments minéraux ; cette fonction de «pompes biologiques» est recherchée pour limiter les fuites hors système cultivé et pour améliorer des sols pauvres afin de les rendre productifs et /ou de les restaurer.

Ces quelques exemples montrent que les performances de ces systèmes concernent les rendements, mais aussi la transformation durable du milieu qui permet ces niveaux de production. Nous pouvons aussi, ici, évoquer la gestion de l'eau par la pratique du mulch et la conception d'un calendrier adapté, mais aussi l'accumulation de matière organique et la constitution d'un réseau de racines qui confèrent une amélioration des propriétés physiques du sol, en particulier de la stabilité structurale.

Deuxièmement, la présente étude conclut que la culture d'association en intercalaire peut affecter positivement le rendement en grains des espèces par rapport à la monoculture, à partir de la relation de concurrence qui s'établit entre les deux espèces due à une compétition pour l'utilisation optimale des ressources environnementales. Grâce aux indices de compatibilité, une sélection plus avancée des variétés est possible, afin d'identifier les variétés compatibles au système de culture intercalaire et qui sont observés comme les plus rentables. En général, le maïs est une espèce dominante dans toutes les associations de part sa nature. Mais la valeur économique d'une association est plus élevée par rapport à la monoculture du fait que, malgré un faible rendement obtenu en association, les légumineuses sont plus chères sur le marché, ce qui ne permet pas à la monoculture de maïs d'atteindre le niveau rentable gagné avec les légumineuses.

L'approche expérimentale couplée avec la modélisation des cultures a permis d'établir un élément crucial du fonctionnement des associations qu'est le partage de la lumière entre les

espèces et de par l'implication de cette ressource dans de multiples processus de développement et croissance des cultures. Les résultats obtenus ont démontré qu'il ya eu une grande compétition pour la lumière dans les associations (plus précisément dans l'arrangement spatial en bande) par rapport aux monocultures, sur la plante de couverture qu'est le soja. Ce qui implique que l'interception du rayonnement par l'espèce dominante, le maïs dans notre cas, a eu un impact direct sur la qualité et la quantité de la lumière interceptée par l'espèce dominée. La réduction de la quantité de lumière reçue par le soja a pu avoir des effets négatifs sur sa croissance et sur son rendement en grains du fait que la compétition pour la lumière a pu affecter aussi la fixation symbiotique de la légumineuse.

## **6.2. Perspectives**

Au cours des expérimentations, il s'était révélé un problème d'envahissement par la mauvaise herbe dans les associations et les rotations de culture, ce qui peut constituer un des critères de performance de ces systèmes. Le suivi de l'évolution des espèces de mauvaises herbes en prenant en compte la densité, l'arrangement spatial, leur biomasse, ainsi que le type de groupe fonctionnel qui y persiste, durant toute la période d'insertion de la plante de couverture, que nous n'avons pas réalisé au cours de la thèse, devrait permettre d'étudier le rapport entre les bénéfiques pour les mauvaises herbes et l'azote en interculture *versus* la perte de rendement.

Pour l'approche expérimentale nous avons restreint notre étude sur une échelle saisonnière car le processus de compétition que l'on voulait étudier pouvait s'appréhender à cette échelle de temps. Il est toutefois probable qu'en plus de la compétition, certains processus de facilitation peuvent s'exprimer sur des pas de temps plus long. Par exemple, l'azote absorbé ou fixé par la plante de couverture en période d'interculture pourra être restitué à la culture suivante conduisant ainsi à réduire ses besoins en engrais azotés. De même, l'accroissement de production de biomasse grâce à la plante de couverture peut conduire à augmenter la teneur en matière organique du sol à moyen terme, améliorant ainsi sa fertilité ; la présence de la plante de couverture peut également améliorer la porosité biologique des sols, conduisant ainsi à le protéger contre les phénomènes d'érosion par l'augmentation de la matière organique du sol due à son activité biologique croissante. L'évaluation des conséquences de ces processus sur les performances agronomiques et environnementales nécessiterait donc des études expérimentales et de modélisation menées à plus long terme. Il faudra aussi améliorer pour

l'étude de ces systèmes par l'évaluation de l'impact de l'insertion de la plante de couverture sur la réduction des bioagresseurs comme les maladies et les attaques parasitaires.

La recherche dans ce domaine propose de nombreux défis aux agronomes et aux sélectionneurs, car les systèmes mettent en cause des interactions complexes entre espèces et génotypes à l'intérieur des espèces et entre espèces. Ils impliquent d'autre part la prise en compte de pratiques et de circonstances environnementales, rendant difficile la sélection des meilleures variétés pour ces différentes associations. Un tel système peut être facilement pratiqué par les paysans de zone agricole de basse altitude. Par conséquent, un revenu socio-économique plus élevé pour le système agricole, ainsi que la conservation des sols peuvent être obtenus dans de tels environnements.

## Références bibliographiques

1. Aasim M., Umer E.M., Karim A., 2008. “Yield and competition indices of intercropping cotton (*Gossypium hirsutum* L.) using different planting patterns”. *Ankara Üniveritesi Ziraat Fakültesi. Tarım Bilimleri Dergisi*. 14 (4): 326-333.
2. Abiven S., 2001. “Effet de la qualité et de la localisation initial dans le sol sur la décomposition de résidus de culture”. *DEA*, Paris, INAA P-G, Paris VI : 41 p.
3. Abuzar M.R., Sadozai G.U., Baloch M.S., Baloch A.A., Shah I.H., Javaid T., Hussain N., 2011. Effect of plant population densities on yield of maize. *The Journal of Animal & Plant Sciences*. 21 (4): 692-695.
4. Adafre A.N., 2016. “Advantages of Maize-Haricot bean intercropping over sole cropping through competition indices at west Badewacho woreda, Hadiya zone, SNNPR”. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*. 4 (1): 1-8.
5. Adetiloye P.O., 1986. “Effect of mixture plant population and two intercropping patterns on the performance of maize –cowpea association Nigeria Journal”. *Agronomy*. 1(13): 73-77.
6. Adiku S.G.K., Jones J.W., Kumaga F.K., Tonyigah A., 2009. “Effects of crop rotation and fallow residue management on maize growth, yield and soil carbon in a savannah-forest transition zone of Ghana”. *Journal of Agriculture Science*. 147: 313-322.
7. AFD, 2006. “Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) ”. *Paris, France*. 68 p.
8. Agboola A.A., Fayemi A.A., 1971. “Preliminary trials on the intercropping of maize with different tropical legumes in western Nigeria”. *J. Agric. Sci. Camb.* 77: 219-225.
9. Agegnehu G., Ghizam A., Sinebo W., 2006. “Yield performance and land-use efficiency of barley and faba bean mixed cropping in Ethiopian highlands”. *Eur. J. Agron.* 25: 202-207.
10. Alberts E, Neibling WH, 1994. “Influence of crop residues on water erosion”. In “Managing Agricultural Residues, Unger PW” (Eds.), *Lewis Pub.* : 20-39.

11. Alhassan G.A., Kalu B.A., Egbe O.M., 2012. "Influence of Planting Densities on the Performance of Intercropped Bamabra Groundnut with Cowpea in Makurdi, Benue State, Nigeria". *International Journal of Development and Sustainability*. 1 (3): 1-20.
12. Alhaji I.H., 2008. Performance of some cowpea varieties under sole and intercropping with maize African Research Review. 2 (3): 278-291.
13. Allen Jr. L., Sinclair T., Lemon, E., 1976. "Radiation and microclimate relationships in multiple cropping systems". *American Society of Agronomy, Multiple Cropping*. 27: 171-200.
14. Aloni K.J., Mergeai G., 2010. "Le stylo, plante révolutionnaire pour l'agriculteur congolais. La Voix du Congo Profond, le magazine d'un Congo en marche". *Centre Agronomique et Vétérinaire Tropical de Kinshasa*. Trimestriel Ed. 3 : 8-10.
15. Amadji F., Adjé I., Maliki R., Téblékou K., 2007. "Promotion des systèmes de semis direct sous couverture végétale au Bénin : état des lieux, travaux de terrain et perspectives". Exposé présenté par l'Equipe RD Savè des collines, 24-28 septembre 2007 à Maroua, Cameroun.
16. Andersen M.K., Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2004. "Biomass production, symbiotic nitrogen fixation and inorganic N use in dual and tri-component annual intercrops". *Plant and Soil*. 266: 273-287.
17. Andrew D.J., Kassam A.H., 1976. "The importance of multiple cropping in increasing world food supplies". *American Society of Agronomy, Multiple cropping*. 27: 1-10.
18. Anil L., Park J., Phipps R.H., Miller F.A., 1998. "Temperate intercropping of cereals for forage: a review of the potential for growth and utilization with particular reference to the UK". *Grass For. Sci*. 53: 301-317.
19. Anuaneyulu V.R., Singh S.P., Pla M., 1982. "Effect of competition free period and technique and pattern of pearl millet planting on growth and yield of mungbean and total productivity in solid pearl millet and pearl millet/mungbean intercropping system". *Indian J. Agron.*, 27: 219-226.
20. Arkebauer T.J., Norman J.M., Sullivan C.Y., 1995. "From cell growth to leaf growth. III. Kinetics of leaf expansion". *Agronomy Journal*. 87: 112-121.
21. Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E., Hatfield J., 1984. "Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat". *Agronomy Journal*, 76(2): 300-306.

22. Atta-Krah A.N., Kang B.T., 1993. "Alley farming as a potential agricultural production system for the humid and subhumid tropics". *American Society of Agronomy, Technologies for sustainable agriculture in the tropics, Chap. 6.* 56: 67-76.
23. Azontonde A., Felle C., Ganry F., Remy J.C., 1998. "Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au Sud du Bénin". *Agriculture et développement.* 18 : 55-62.
24. Azooz R.H., Arshad M.A., Franzluebbbers A.J., 1996. "Pore Size Distribution and Hydraulic Conductivity Affected by Tillage in Northwestern Canada". *Soil Science of Society American Journal.* 90 : 1197-1201
25. Bagayoko, Mason M.S.C., Traore S., 1988. "The role of cowpea on pearl millet yield, nuptake and soil nutrient status in millet-Cowpea rotation in Mali". *In "Soil fertility management in West Africa land use system" (Eds). G. Renard, A. Neef, K. Becker, M. Vonoppen. Margrave Verlag Weikersheim, Germany.* 109–144
26. Balarabé O., 2004. "Expériences sur les systèmes de culture sur couverture végétale (SCV) acquises par l'ONG TAFa et l'équipe du CIRAD depuis plus de 10 ans. Valoriser leurs acquis sur le plan technique et sur le plan de l'organisation". *Mémoire. Antsirabé : TAFa, Inédit.* 65 p.
27. Balasubramanian V., 1999. "Farmer adoption of improved nitrogen management technologies in rice farming: technical constraints and opportunities for improvement". *Nutrien Cycling in Agrecosystems.* 53: 93-101.
28. Baldisera T., Frak E., Carvalo P., Louarn G., 2014. "Plant development controls leaf area expansion in alfalfa plants competing for light". *Annals of Botany.* 113 (1): 145-157.
29. Ballare C.L., Casal J.J., 2000. "Light signals pareemed by crop and weed plants". *Field Crops Res.* 67: 149–160.
30. Bandyopandhyay S.K., De R., 1986. "N relationship in a legume-non legume association grown in an intercropping system". *Fertilizer Research.* 10: 73-82.
31. Banik P., 1996. "Evaluation of Wheat (*Triticum aestivum*) and Legume Intercropping Under 1:1 and 2:1 Row-replacement Series system". *J. Agronomy and Crop Science.* 176: 289-294.

32. Banik P., Midya A., Sarkar B.K., Ghose S.S., 2006. "Wheat and chickpea intercropping systems in an additive series experiment: advantages and weed smothering". *Eur. J. Agron.* 24: 325-332.
33. Banik P., Sasmal T., Ghosal P.K., Bagchi D.K., 2000. "Evaluation of mustard (*Brassica campestris* var. Toria) and legume in 1:1 and 2:1 replacement series system". *J. Agron. Crop Sci.* 185: 9-14.
34. Baret F., 1986. "Contribution au suivi radiométrique de culture de céréales". *Thèse de doctorat. Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay.* Inédit. 182 p.
35. Barker D.C., Knezevic S.Z., Martin A.R., Lindquis J.L., 2006. "Effect of nitrogen addition on the comparative productivity of corn and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*)". *Weed Science.* 54: 354-363.
36. Barrillot R., Frank E., Combes D., Durand J.L., Abraham J., Escuabar-Gutiérrez J., 2010. "What determines the complex kinetics of stomatal conductance under blueless PAR in *Festuca arundinacea*? Subsequent effects on leaf transpiration". *J. Exp Bot.* 61: 2795-2806.
37. Barros A.T., 1991. "Efeitos de cultivares e número de linhas de soja sobre o cafeeiro em sistema de consórcio". Lavras, MG, Brésil, Escola Sup. de Agric. De Lavras. Thèse de maîtrise. Inédit.
38. Baumann D.T., Bastiaans L., Goudriaan J., van Laar H.H., Kropff M.J., 2002. "Analysing crop yield and plant quality in an intercropping system using an eco-physiological model for interplant competition". *Agric. Syst.* 73: 173-203.
39. Baumhardt R.L., Wendt C.W. and Keeling J.W., 1993. "Tillage and Furrow Diking Effects on Water Balance and Yields of Sorghum and Cotton." *Soil Science Society of America Journal.* 57: 1077-1083.
40. Beadle C.L., 1993. "Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual". In "Growth Analysis" (Ed.). Hall. *London: Chapman & Hall.* 36-46.
41. Bedoussac L., Justes E., 2010. "The efficiency of a durum wheat-winter pea intercrop to improve yield and wheat grain protein concentration depends on N availability during early growth". *Plant and Soil.* 330: 19-35.
42. Beirnaert G, 1941. "La technique culturale sous l'Equateur". *Publ. INEAC Ser. Techn.* 86 p.



43. Bennouna B., Lahrouni A., Khabba S., 2005. "Paramètres de croissance du maïs dans le Haouz de Marrakech (Maroc)". *Cahiers Agricultures*. 14 : 437 - 446.
44. Ben-Salem H., Zaibet L., Ben-Hammouda M, 2006. "Perspectives de l'adoption du semis direct en Tunisie. Une approche économique". *Options Méditerranéennes, Série A*. 69 : 69-75.
45. Berntsen J., Hauggaard-Nielsen H., Olesen J.E., Petersen B.M., Jensen E.S., Thomsen A., 2004. "Modelling dry matter production and resource use in intercrops of pea and barley". *Field Crops Res.* 88: 69-83.
46. Biscoe P.V., Gallagher J., 1977. "Weather, dry matter production and yield. Environmental effects on crop physiology". *Proceedings of a symposium held at Long Ashton Research Station, University of Bristol 13-16 April 1975*. 75-100.
47. Bodrero M.L., Darwich N., Andrade F., Nakayama F., 1989. "Intercepción de radiación fotosintéticamente activa y productividad de soja de segunda sembrada a distintos espaciamientos entre surcos". In "Actas IV Conf. Mundial de Investigación en Soja" (éd). AJ Pascale. *Buenos Aires, Argentine, 5-9 mars, Asociación Argentina de la Soja (AASOJA)*. 799-804.
48. Boiffin J., Malezieux E., Picard D., 2001. "Cropping systems for future". In "Crop Science progress and prospects" (Eds.). J. Nösberger, H.H. Geiger, P.C. Struik. *CABI Publishing, Oxon (UK)*. 261-280.
49. Bolstad P.V., Gower S.T., 1990. "Estimation of leaf area index in fourthern Wisconsin forest stands using a portable radiometer". *Tree Physiology*. 7: 115-124.
50. Bonhomme R., Varlet-Grancher C., 1978, "Estimation of the gramineous crop geometry by plant profiles including leaf width variations". *Photosynthetica*. 12: 193-196.
51. Bonhomme R., 1974. "Détermination des profils d'indice foliaire et de rayonnement dans un couvert végétal à l'aide de photographies hémisphériques faites in situ". Thèse de Docteur - Ingénieur, UER Marseille-Luminy. 56 p.
52. Bouman B.A.M., Van Keulen H., Van Laar H.H., Rabbinge R., 1996. "The school of de Wit crop growth simulation models: a pedigree and historical review". *Agricultural systems*. 52: 171-198.
53. Bradfield R., 1974. "Intensive multiple cropping". *Trop. Agric. Trinidad*. 51: 91-93.
54. Brisson N.B., Mary D., Ripoche M.H., Jeuffroy F., Ruget B., Nicoullaud P., Gate F., Devienne-Barret R., Antonioletti C., Durr G., Richard N., Beaudoin S., Recous X.,

- Tayot D., Plenet P., cellier J.M., Machet J.M., Meynard, Delecolle R., 1998. "STICS: a generic model for the simulation of crop and their water and nitrogen balance. Theory, parametrization and I applied to wheat and corn". *Agronomie*. 18: 311-346.
55. Brudtland G., 1987. "Our common future". *World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford, RU*. In "Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Part. V. Tendances actuelles et perspectives de l'agriculture : Agricultures et environnements" (Eds.). T.A.E. Hassani, E. Persoons. *Hatier-Aupelf-Uref, Universités Francophones*. 519-526.
  56. Caldwell M., Schulze E., Zwölfer H., 1987. "Plant architecture and resource competition. Potentials and limitations of ecosystem analysis". *Ecological studies*. 61: 164-179.
  57. Cambardella C.A., Elliot E.T., 1993. "Carbon and Nitrogene Distribution in Agregates from Cultivated and Native Grassland Soils." *Soil Science Society of America Journal*. 57: 1071-1076.
  58. Capillon A., Seguy L., 2002. "Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale". *C.R. Acad. Agri. Fr.*, 2002. 88 (5) : 63-70.
  59. Carof M., 2006. "Fonctionnement de peuplements en semis direct associant du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) à différentes plantes de couverture en climat tempéré". *Ecole doctorale ABIES, UMR agronomie INRA, INAP-G*. Inédit. 115 p.
  60. Carsky R.J., Abaidoo R., Dashiell K.E., Sanginga N., 1997. "Effect of soybean on subsequent maize grain yield in Guinea savanna of West Africa". *Afr. Crop. Sci. J*. 5:31-39
  61. Carsky R.J., Becker M., Hauser S., 2001. "Mucuna cover crop fallow systems: Potential and limitations". In "Sustaining Soil Fertility in West Africa" (Eds) G. Tian, F. Ishida, D. Keatinge. *Soil Science Society of American and American Society of Agronomy, Special Publication Madison WI*. 58: 111-135.
  62. Casenave A. et Valentin C., 1989. "Les états de surface de la zone Sahélienne : Influence sur l'infiltration". Paris, France, IRD.
  63. CDSR, 2001. "Le semis direct: potentiel et limites pour une agriculture durable en Afrique du Nord". *Commission Economique pour l'Afrique, Nations Unis*. Tanger, Maroc. 32 p.

64. CGIAR, 1978. "Farming systems research at the international agricultural research centers". *Report of a Panel headed by Dr. John Dillon*. Washington, DC, World Bank.
65. Chason J.W., Baldocchi D.D., Huston M.A., 1991. "A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area". *Agricultural and Forest Meteorology*. 57: 107-128
66. Chatterjee A.K., Reddy B., 1974. "Wild grass flora in and around India Institut of Technology Kargapur Campus". *The Harvester*. 16: 7-10.
67. Chen C., Westcott M., Neill K., Wichman D., Knox M., 2004. "Row configuration and nitrogen application for barley-pea intercropping in Montana". *Agron. J.* 96: 1730-1738.
68. Chen J.M., Black T.A., 1992. "Defining leaf area index for non-flat leaves". *Plant, cell and Environment*. 15: 421-429.
69. Chen T.H., Henerson-Seller A., Milly P.C.D., Pitman A.J., Beljaars A.C.M., Polcher J., Abramopoulos F., Boone A., Chang S., Chen F., Dai Y., Desbouough E.E., Dickinson R.E., Dumenil L., Ek M., Garratt J.R., Gedneny N., Gusew Y.M., Kim J., Koster R., Kowalczyk E.A., Loval K., Lean J., Lettenmaier D., Liang X., Makfoul J.-F., Mengelkamp H.-T., Mitchel K., Nanonova O.N., Noilhan J., Robock A., Rozenzweig C., Schaake J., Schlosser C.A., Schulz J.-P., Shao Y., Shimakin A.B., Verseghy D.L., Wetzell P., Wood E.F., Xue Y., Yang Z.-L., Zeng Q., 1997. "Cabauw experimental results from the Project for intercomparison for Land-surface Parameterization Schemes". *J climate*. 10: 1194-1215.
70. Cheruiyot E.K., Mumera L.M., Nakhone L.N., Mwonga S.M., 2003. "Effect of legume-managed fallow on weeds and soil nitrogen in following maize (*Zea mays* L.) and wheat (*Triticum aestivum* L.) crops in the Rift Valley highlands of Kenya". *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 43: 597-604.
71. Cho Y.S., Lee B.Z., Choe Z.R., Ockerby S.E., 2001. "An evaluation of a no-tillage, unfertilised, direct-sown, wheta-rice cropping system in Korea". *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 43-60.
72. Choudhary V.K., 2014. "Suitability of maize-legume intercrops with optimum row ratio in mid hills of eastern Himalaya, India". *SAARC J. Agri.* 12 (2): 52-62.
73. Chu G., Shen Q., Cao J., 2004. "Nitrogen fixation and N transfer from peanut to rice cultivated in aerobic soil in an intercropping system and its effect on soil N fertility". *Plant and Soil*. 263: 17-27.

74. CIALCA, 2008. "Rapport d'avancement 4 –Bujumbura. Amélioration des moyens de vie basés sur l'agriculture en Afrique Centrale par le biais d'une productivité de systèmes durablement accrue en vue d'améliorer les revenus, la sécurité alimentaire et l'environnement". *Réunion de lancement de CIALCA-II, Bujumbura, du 28 au 31 octobre*. 28 p.
75. CIPEA, 1984. "Rapport annuel du CIPEA 1983". Addis-Abeba, Ethiopie.
76. Connolly J., Goma H.C., Rahim K., 2001. "The information content of indicators in intercropping research". *Agric. Ecosyst. Environ.* 87: 191- 207.
77. Connolly J., Wayne P., Murray R., 1990. "Time course of plant-plant interactions in experimental mixtures of annuals – Density, frequency and nutrient effects". *Oecologia*. 82: 513-526.
78. Cousens R., O'Neill M., 1993. "Density dependence of replacement series experiments". *Oikos*, 66 (2): 347–352.
79. Crookston R., Trehame K., Ludford P., Ozbun J., 1975. "Response of beans to shading". *Crop Sci.* 15: 412-416.
80. Cruz P., Soussana J.F., 1997. "Mixed crops". In "Diagnosis of the nitrogen status in crops" (ed). G. Lemaire. *Springer, Berlin*. 131-144.
81. Cu T.T., Hutson J., Schuller K.A., 2005. "Mixed culture of wheat (*Triticum aestivum* L.) with white lupin (*Lupinus albus* L.) improves the growth and phosphorus nutrition of the wheat". *Plant Soil*. 272, 143-151.
82. Cutini A., Matteucci G., Mugnozza G.S., 1998. "Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forest". *For Eco Manage.* 105: 55-65
83. Dapaah H.K., Asafu-Agyei J.N., Ennin S. A., Yamoah C., 2003. "Yield stability of cassava, maize, soya bean and cowpea intercrops". *J. Agric. Sci.* 140: 73- 82.
84. Dashiell K.E., Gumisiriza G., 1989. "Recent advances made in developing soybean cultivars with improved seed storability for the tropics". In "Actas IV Conf. Mundial de Investigación en Soja, Buenos Aires, Argentine" (éd). AJ Pascale. Asociación Argentina de la Soja (AASOJA). 2295-2302.
85. De R., Rao Y.Y., Ali W., 1983. "Grain and fodder legumes as preceding crops affecting the yield and N economy in rice". *Journal of Agricultural Science, Cambridge*. 101: 463 – 466.
86. De Wit C.T., 1960. "On competition". *Verlagen Landbouwkundige Onderzoekingen*. 66: 1–82.

87. Denisoff I., Devred R., 1954. “Cartes des sols et de la végétation du Congo Belge et du Ruanda-Urundi : Mvuazi (Bas-Congo)”. *Publications de l’Institut National pour l’Etude Agronomique du Congo Belge (INEAC)*. Bruxelles, Belgique. 44 p.
88. Dhima K.V., Lithourgidis A.A., Vasilakoglou I.B., Dordas C.A., 2007. “Competition indices of common vetch and cereal intercrops in two seeding ratio”. *Field Crop Res.* 100: 249-256.
89. Dong Q.X., Louam G., Wang Y.M., Barczy J.F., de Relfye P., 2008. “Does the structure-function model greenlab deal with the phenotypic plasticity induced by plant spacing? A case study on tomato”. *Annals of Botany.* 101: 1195-1206.
90. Dongmo A.L., Mbiandoun M., Ko Awono, Awa D., 2006. “Modes collectifs de gestion des biomasses végétales, de la fertilité du sol et des relations agriculture-élevage dans les terroirs du Nord Cameroun”. *ARDESAC, rapport annuel 2006 du programme 2.2.* 26 p.
91. Dounias I., Jouve P., 2001. “Les systèmes de culture à base de couverture végétale et semis direct en zones tropicales”. *Synthèse bibliographique. Etudes et travaux n°19. Cirad/Ca, Cnearc.* 164 p.
92. Dunin F.X., 2002. “Integrating agroforestry and perennial pastures to mitigate water logging and secondary salinity”. *Agricultural Water Management.* 53: 259-570.
93. Duthoit S, 2006. “Prise en compte de l’agrégation des cultures dans la simulation du transfert radiatif : importance pour l’estimation de l’indice foliaire (LAI), de la parcelle au paysage”. Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier –Toulouse III, France. Inédit. 189 p.
94. Dwivedi A., Dev I., Kumar V., Yadav R.S., Yadav M., Gupta D., Singh A., Tomar S.S., 2015. “Potential role of maize-legume intercropping systems to improve soil fertility status under smallholder farming systems for sustainable agriculture in India”. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research.* 4 (3): 145-157.
95. Edmeades G.O., Daynard T.B., 1979. “The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants”. *Can. J. Plant Sci.* 59: 585-601.
96. Edmeades G.O., 1990. “Significant accomplishments of Ghana grains development project during phase I, 1979-1983”. *Paper presented at the 10<sup>th</sup> Ann. Maize and Cowpea Workshop of the Ghana Grains Dev. Proj. Kumasi, Ghana.* 20-23.

97. Edwards W., Triplett G.B., Van Doren D.M., Owens L.B., Redmond C.E., Dick W.A., 1993. "Tillage Studies with a Corn-Soybean Rotation: Hydrology and Sediments Loss." *Soil Science Society of America Journal* 57: 1051-1055.
98. Egbe O.M, 2005. "Evaluation of some agronomic potential of pigeonpea genotypes for intercropping with maize and sorghum in Southern Guinea Savanna". Ph D. thesis, University of Agriculture, Makurdi, Nigeria.
99. Egbe O.M., Alibo S.E., Nwueze I., 2010. "Evaluation of Some Extra-Early-and Early-Maturing Cowpea Varieties for Intercropping with Maize in Southern Guinea Savanna of Nigeria". *Agric. Biol. J. N. Am.* 1(5): 845-858.
100. Ehlers W., 1975. "Observations on earthworm channels and infiltration on tilled and untilled loess soil." *Soil Science.* 119(3): 242-249.
101. Elings A., 2000. "Estimation of leaf area in tropical maize". *Agron. J.* 92: 436 - 444.
102. Escribano J., 2006. "Étude des effets de l'agriculture de conservation par rapport à l'agriculture traditionnelle". *Options Méditerranéennes.* 69 (A) : 57-61.
103. Esmaeili A., Sadeghpour A., Hosseini S.M.B., Jahanzad E., Chaichi M.R., Hashemi M., 2011. "Evaluation of seed yield and competition indices for intercropping barley (*Hordeum vulgare*) and annual medic (*Medicago scutellata*)". *International Journal of Plante Production.* 5 (4): 395 – 404.
104. FAO, 2005. "Regards sur l'agriculture de conservation en Afrique de l'ouest et du centre et ses perspectives". *Contribution au 3<sup>ème</sup> Congrès mondial d'agriculture de conservation à Nairobi. Rome, Italie.* 114 p.
105. FAO, 2011. "Produire plus avec moins. Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne". *Division de la production végétale et de la protection des plantes, Rome, Italie.* 102 p.
106. FAO., 2007. "Agriculture de conservation". 42 p. <http://www.fao.org/ag/ca/fr/1a.htm>
107. FAO/PNE., 1998. "Synthèse Agronomique des essais de fertilisation dans la République Démocratique du Congo". Rapport technique, Rome. n°98/1. 105 p.
108. Fassnacht K.S., Gower S.T., Norman J.M., McMurtie R.E., 1994. "A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index forests". *Agricultural and Forest Meteorology.* 71: 183-207.
109. Fenandez-Aparicio M., Josefina C., Sillero D.R., 2007. "Intercropping with cereals reduces infection by *Orobanche crenata* in legumes". *Crop Protec.* 26: 1166-1172.

110. Ferguson J., 2015. "Permaculture as farming practice and international grassroots network: a multidisciplinary study". Thèse de doctorat. Université de l'Illinois.
111. Fernández E.C.M., Davey C.B., 1993. "Alley cropping on an acid soil in the upper amazon : mulch fertilizer, and hedgrow root pruning effects". In "Technologies for sustainable agriculture in the tropics" (Eds). J. Ragland, R. Lal. *ASA Special Publication, Madison, WI, USA*. 56: 77-96.
112. FFEM, 2008. "Sols tropicaux, pratiques SCV, services écosystémiques". *Collectif « Sol-SCV » avec AFD/FFEM*. 40 p.
113. Findeling A., Chanzy, A., de Louvigny, N., 2003. "Modeling heat and water flows through a mulch allowing for convective and radiative exchanges in the mulch". *Water Resources Research*. 25(9): 10-1029, 1244.
114. Fleisher D., Timlin D., 2006. "Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy". *Agricultural and Forest Meteorology*. 139: 84-93.
115. Fournier C., Andrieu B., 1998. "A 3D architectural and process-based model of maize development". *Annals of Botany*. 81: 233-250.
116. France J., Thornley J.H.M., 1984. "Mathematical Models in Agriculture". *Butterworths, London*. 335 p.
117. Francis C.A., Clegg M.D., 1990. "Crop rotations in sustainable production systems". In "Sustainable agricultural systems. Soil and water conservation society" (eds). C.A. Edwards, R Lal, P. Madden R., Miller and G., House. *Delray Beach, FL, USA, St Lucie Press*. 56: 107-122.
118. Francis C.A., 1989. "New innovation in intercropping research". In, Research Methods for Cereal/Legume intercropping. S.R., Waddington, A.F.E., Palmer and O.T., Edje (Eds). *Proc. of a Workshop on Research Methods for Cereal/Legume Intercropping in Eastern and Southern Africa*. Mexico, DF, CIMMYT.
119. Fukai S., Trenbath B.R., 1993. "Processes determining intercrop productivity and yields of component crops". *Field Crops Research*. 34: 247-271.
120. Garcia A., 2002. "Façon culturales: Semis et implantation de peuplements". In "Le soja dans les tropiques : amélioration et production". Paliwal R.L. (éd). *Food & Agriculture Org*. 382 p.
121. Baert G., Embrechts J., De Dapper M., Mbende M., 2005. "Valorisation des données disponibles des « ressources naturelles physiques » de la R.D. Congo pour une gestion

- rationnelle et durable des terres”. In “Carte de reconnaissance”. Projet VLIR-UOS. Laboratoire des Sciences du sol, Université de Gand, Belgique.
122. Gfeller A., Wirth J., 2017. “Les cultures intermédiaires allélopathiques: un moyen de lutte contre les adventices ? ” *Innovations Agronomiques*. 62, 33-41.
  123. Ghosh P.K., 2004. “Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India”. *Field Crops Res.* 88: 227-237.
  124. Giller K.E., Wilson K.J., 1991. “Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems”. *CAB International, Wallingford, England*. 167-237.
  125. Gilley J.E., Finkner S.C., Varvel G.E., 1987. “Slope length and surface residue influences on runoff and erosion”. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 30: 148-152.
  126. Giraud P.N., Loyer D., 2008. “Innover pour protéger : Pour une « révolution doublement verte » en Afrique”. *J. Biodiversité, Nature et Développement. Regards sur la terre*. 197-200.
  127. Glibert P.M., Harrison J., Heil C., Seitzinger S, 2006. “Escalating Worldwide use of Urea – A Global Change Contributing to Coastal Eutrophication”. *Biogeochemistry*. 77 (3): 441-463.
  128. Goldberd D., 1990. “Components of resource competition in plant communities. In Perspectives on plant competition”. *Academic Press, San Diego*. 27-50.
  129. Grant R.F., Hesketh J.D., 1992. “Canopy structure of maize (*Zea mays* L.) at different populations: simulation and experimental verification”. *Biotronics*. 21: 11-24.
  130. Griffon M., 2006. “Nourrir la planète”. *Odile Jacobs, Sciences, Paris*. 456 p.
  131. Guillermo A.D., Rey H., Lecoeur J., Izquierdo N., Aguirreza L., Tardieu F., Turc O., 2003. “A whole-plant analysis of the dynamics of expansion of individual leaves of two sun-flower hybrids”. *Journal of Experimental Botany*. 54: 2541–2552.
  132. Hamd-Alla W.A., Shalaby E.M., Dawood R.A., Zohry A.A., 2014. “Effect of cowpea (*Vigna sinensis* L.) with maize (*Zea mays* L.) intercropping on yield and its components”. *International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*. 8 (11): 1170-1176.
  133. Hang A., McCloud D., Boote K., Duncan W., 1984. “Shade effects on growth, partitioning and yield components of peanuts”. *Crop Sci.* 24: 109-115.



134. Hardter R., Horst W.J., Schmidt G., Frey E., 1991. "Yields and land use efficiency of maize-cowpea crop rotations in comparison to mixed and monocropping on an alfisol in Northern Ghana". *J. Agronomy and Crop Science*. 166: 326-337.
135. Harris D., Natarajan M., Willey R.W., 1987. "Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought. 1. Dry-matter production, yield, and light interception". *Field Crops Research*. 17: 259-272.
136. Harroy J.P., 1944. "Afrique, terre qui meurt. La dégradation des sols africains sous l'influence de la Colonisation". *Bruxelles, Hayez*. 557 p.
137. Hassani T.A.E., 1994. "Croissance et développement des plantes cultivées. In T.A.E. Hassani, et E. Persoons (Eds.) *Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale. Bases physiologiques de l'élaboration du rendement*". *Hatier-Aupelf-Uref, Universités Francophones*. 119-152.
138. Hauggaard-Nielsen H., Jensen E.S., 2005. "Facilitative root interactions in intercrops". *Plant Soil*. 274: 237-250.
139. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001a. "Temporal and spatial distribution of roots and competition for nitrogen in pea-barley intercrops – a field study employing P-32 technique". *Plant Soil*. 236: 63-74.
140. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001b. "Evaluating pea and barley cultivars for complementary in intercropping at different levels of soil N availability". *Field Crop Res*. 72: 185-196.
141. Hauggaard-Nielsen H., Ambus P., Jensen E.S., 2001c. "Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea - barley intercropping". *Field Crop Res*. 70: 101-109.
142. Hauggaard-Nielsen H., Andersen M.K., Jørnsgaard B., Jensen E.S., 2006. "Density and relative frequency effects on competitive interactions and resource use in pea-barley intercrops". *Field Crops Research*. 95: 256–267.
143. Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., von Fragstein P., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. "Pea–barley intercropping for efficient symbiotic N<sub>2</sub>-fixation, soil N acquisition and use of other nutrients in European organic cropping systems". *Field Crops Research*. 113: 64-71.

144. Hauser S., Norgrove L., Nkem J., 2006. "Groundnut/ maize/ cassava intercrop yield response to fallow age, cropping frequency and crop plant density on an Ultisol in southern Cameroon". *Biological Agriculture and Horticulture*. 24: 275-292.
145. Heal O.W., Anderson J.M., Swift M.J., 1997. "Plant Litter Quality and Decomposition: An Historical Overview". In "Driven By Nature Plant Litter Quality and Decomposition". CAB INTERNATIONAL. London. 4-30.
146. Hiebsch C.K., 1980. "Principles of Intercropping: Effect of N Fertilization and Crop Duration on Equivalency Ratios in Intercrops versus Monoculture Comparisons". PhD thesis, North Carolina State University, Raleigh.
147. Hiebsch C., Tetio-Kegho F., Chirembo F.P., 1995. "Plant Density and Soybean Maturity in a Soybean-Maize Intercrop". *Agron. J.* 87: 965-970.
148. Hinsinger P., 2001. "Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review". *Plant Soil*. 237: 173-195.
149. Hinsinger P., Betencourt E., Bernard L., Brauman A., Plassard C., Shen J., Tang X., Zhang F., 2011. "P for Two, Sharing a Scarce Resource: Soil Phosphorus Acquisition in the Rhizosphere of Intercropped Species". *Plant Physiology*. 156: 1078-1086.
150. Horwith B., 1984. "A role for intercropping in modern agriculture". *BioSci.* 35: 286-291. [http://www.actahort.org/books/633/633\\_19.htm](http://www.actahort.org/books/633/633_19.htm).
151. Husson O., Charpentier H., Naudin K., Moussa N., Michellon R., Andrianasolo H., Razanamparany C., Rakotoarinivo C., Rakotondramanana, Enjalric F., Séguy L., 2009. "La mise en place de systèmes de culture en semis direct : Le choix des itinéraires techniques. Manuel pratique du semis direct à Madagascar". *CIRAD/AFD*. 2 (2) : 76 p.
152. Huxley P.A, Miangu Z., 1978. "Use of a systematic spacing design as an aid to the study of intercropping: some general consideration". *Experimental Agriculture*. 14: 49-56.
153. ICRISAT (International Crops Research Institute for the semi-arid tropics), 1990. "Annual report 1989". Patancheru A.P. 502324, India.
154. IFEN, 2007. "Les pesticides dans les eaux. Données 2005". Les dossiers IFEN 9.
155. Ilnicki R.D., Enache A.J., 1992. "Subterranean clover living mulch: an alternative method of weed control". *Agric. Ecosystems Environ.* 40: 249-264.
156. INERA, 2013. "Guide technique pour la production de semences initiales des principales cultures vivrières à graines en RD.Congo. Projet CTB Appui à

- l'amélioration de la production végétale". Edition I, Dr Ir. Stéphane Dubois. 111 : 47-64
157. INERA-MVUAZI, 2006. "Catalogue des matériels génétiques du Centre de recherche de l'INERA-MVUAZI". 84p
  158. ITAB, 2002. "Activités biologiques et fertilité des sols : Intérêts et limites des méthodes analytiques disponibles". *Commission « agronomie-système de production »*. Edition I. Paris, France. 27p.
  159. Jahansooz M.R., Yumusa I.A., Coventry D.R., Palmer A.R., Eamus D., 2007. "Radiation and water-use associated with growth and yields of wheat and chickpea in sole and mixed crops". *Eur. J. Agron.* 26: 275-282.
  160. Jensen E.S., Hauggaard-Nielsen H., 2003. "How can increased use of biological N<sub>2</sub> fixation in agriculture benefit the environment?" *Plant and Soil.* 252: 177-186.
  161. Jensen E.S., 1996. "Grain yield, symbiotic N<sub>2</sub> fixation and interspecific competition for inorganic N in pea-barley intercrops". *Plant Soil.* 182: 25-38.
  162. Jeranyama P., Hesterman O.B., Waddington S.R., Harwood R.R., 2000. "Relay-Intercropping of Sunhemp and Cowpea into a Smallholder Maize system in Zimbabwe". *Agron J.* 92: 239- 244.
  163. Jeyakumaran J., Seran T.H., 2007. "Studies on intercropping capsicum (*Capsicum annum L.*) with bushitao (*Vigna unguiculata L.*)". *Proceedings of the 6<sup>th</sup> Annual Research Session, Oct. 18-19, Trincomalee Campus, EUSL*, 431-440.
  164. Jones C.A., Kiniry Jr, 1986. "CERES maize. A simulation model of maize growth and development". *Texas A&M University Press, College Station.* 194 p.
  165. Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Boote K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman A.J., Ritchie J.T., 2003. "The DSSAT cropping system model". *Europ. J. Agron.* 18: 235–265.
  166. Jonkheere I.S., Fleck K., Nackaerts B., Muys P., Coppin M., Weiss, Baret F., 2004. "Review of method of in situ LAI Determination, Part1. Theories sensors and hemispherical photography". *Agricultural and Forest Meteorology.* 121 (1-2): 19-35.
  167. Jurion F., Henry, J., 1967. "De l'agriculture itinérante l'agriculture intensifiée". *INEAC, Bruxelles.* 498 p.
  168. Kalra G.S., Ganger B., 1980. "Economics of intercropping of different legumes with maize at different levels of N under rainfed conditions". *Ind. J. Agro.* 25: 181-185.

169. Kang B.T., Grimme H., Lawson T.L., 1985. "Alley-cropping sequentially cropped maize and cowpea with leucaena on a sandy soil in southern Nigeria". *Plant and soil*. 85: 267-277.
170. Kasasa P., 1999. "Quantification of nitrogen fixation by promiscuous soyabean in Zimbabwean soils". MPhil. Thesis. University of Zimbabwe, Harare, Zimbabwe.
171. Kasetsart University, 1989. "Annual report". *Bangkok, Department of Agronomy and National Corn and Sorghum Research Center*.
172. Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G., Meinke H., Hochman Z., McLean G., Verburg K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., Smith C.J., 2003. "An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation". *Europ. J. Agron.* 18: 267–288.
173. Khonde P., Tshiabukole K., Kankolongo M., Hauser S., Djamba M., Vumilia K., Nkongolo K., 2018. "Evaluation of Yield and Competition Indices for Intercropped Eight Maize Varieties, Soybean and Cowpea in the Zone of Savanna of South-West RD Congo". *Open Access Library Journal*. 5: e3746. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103746>
174. Kiniry J., Jones C., O'toole J., Blanchet R., Cabelguenne, M., Spanel D., 1989. "Radiation-use efficiency in biomass accumulation prior to grain-filling for five grain-crop species". *Field Crops Res.* 20: 51-64.
175. Kizungu V., 2001. "Méthodes d'analyse de données de comptage sur-dispersées par l'inférence statistique conditionnelle exacte. Test de l'impact des pratiques culturelles traditionnelles sur la densité des arthropodes en RDC". Thèse doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1. France. 175 p.
176. Kizungu V.R., Mobula M.V., Bugeme M.D., Bisimwa B.E., Lukombo L.J.-C., Ndjadi S.S., Ngoyi L.H., Pongi K.G., Kabongo T.J.-P., Masheka B.F., Balezi Z.A., Ntamwira B.J., Mbuya K.A., Mumba D.A., Kimwanga N.P., 2021. "Transition vers l'agroécologie (TVA) dans une ferme familiale en vue d'améliorer la sécurité alimentaire et nutritionnelle, la résilience et le bien-être des ménages à Kinshasa". *Revue Africaine d'Environnement et d'Agriculture*. Numéro spécial. 02 : 40-52.

177. Koetz B., Baret F., Poilve H., Hill J., 2005. "Use of coupled canopy structure dynamic and radiative transfer models to estimate biophysical canopy characteristics". *Remote Sens. of Environ.* 95: 115 - 124.
178. Köppen W., 1936. "Das geographische system der climate". In "Handbuch der klimatologie". W. Köppen, R. Geiger (eds). *Grebrüder Borntraeger*, Berlin, p 1-44.
179. Kour M., Thakur N.P., Kumar P., Charak A.S., 2016. "Productivity and profitability of maize (*zea mays*) as influenced by intercropping of rajmash (*Phaseolus vulgaris*) and nutrient management techniques under sub-alpine conditions of Jammu, India". *Agricultural Research Communication Centre, Legume Research.* 39 (6): 970-975.
180. Kumar Rao J.V.D.K., Dart P.J., Sastry P.V.S.S., 1983. "Residual effect of pigeon pea (*Cajanus cajan*) on yield and nitrogen response of maize". *Experimental Agriculture.* 19: 137 – 141.
181. Kumwenda J.D.T., Waddington S.R., Snapp S.S., Jones R.B., Blackie M.J., 1997. "Soil fertility management in southern Africa". In "Africa's Emerging Maize revolution" (Eds). D. Byerlee, C.K. Eicher. *Boulder, CO, USA: Lynne Rienner Publishers.* 157-172.
182. Kussner R., Mossandi R., 2000. "Comparison of direct estimation of leaf area index in natural Norway spruce stands". *Agricultural Systems.* 70: 353-354
183. Labreuche J., Viloingt T., Caboulet D., Daouze J.P., Duval R., Ganteil A., Jouy L., Quere L., Boizard H., Roger-Estrade J., 2007. "La pratique des TCSL en France" In "Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans labour (TCSL) en France" (eds). J. Labreuche, C. Le Souder, P. Castillon, J.F. Ouvry, B. Real, J.C. Germon, S. de Tourdonnet. *ADEME-ARVALIS Institut du végétal-INRA-APCA-AREAS-ITB-CETIOM-IFVV400.* 1 :21-88.
184. Lafargea M. and Tardieu F., 2002. "A model coordinating the elongation of all leaves of a sorghum cultivar was applied to both Mediterranean and Sahelian conditions". *Journal of Experimental Botany.* 53: 715–725.
185. Lafitte R.H., 1987. "On-farm agronomic research conducted in Ghana from 1979-1981. A case study". *Mexico, DF, CIMMYT.*
186. Lafitte R.H., 2002. "Physiologie du maïs tropical. Dans FAO, (eds). Le maïs en zones tropicales : amélioration et production". *FAO.* 381 p.
187. Lahmar R., de Tourdonnet S., Barz P., Düring R.A., Frielinghaus M., Kolli R., Kubat J., Medvedev V., Netland J., Picard D., 2006. "Prospect for conservation agriculture

- in northern and eastern European countries, lessons of KASSA”. In “ninth ESA Congress European education and research in agronomy. Book of Proceedings” (ed). ESA. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica, Warsaw (Poland)*. 11(3): 77-88.
188. Le Dantec V., Dufrêne E., Saugier B., 2000. “Interannual and spatial variation in maximum leaf area index of temperate deciduous stand”. *Forest Ecology and Management*. 134: 71-81.
189. Lebrun J., 1947. “Végétation de la plaine alluviale au Sud du lac Edouard. Exploration Parc Nat. Albert, mission J. LEBRUN (1937-1938)”. *Inst. Parcs Nat. Congo belge*. Fasc.1, 800 p.
190. Léonard J., 1950. “Les groupements végétaux”. *Encyclopédie du Congo belge*. I : 345-389.
191. Lhoste P., 1999. “Intégration des cultures fourragères dans les systèmes de production”. In “Les cultures fourragères tropicales” (éds). G Roberge, B Toutain. *Cirad Collection Repères*. 359-366.
192. Li L., Yang S., Li X., Zhang F., Christie F., 1999. “Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean”. *Plant Soil*. 212: 105–114.
193. Li Z., 2013. “Modélisation de la croissance des plantes en interaction avec la ressource en eau et contrôle optimal de l’irrigation”. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris. Inédit.
194. Liebig M.A., Jones A.J., Mielke L.M., Doran J.W., 1993. “Controlled Wheel Traffic Effects on Soil Properties in Ridge Tillage.” *Soil Science Society of America Journal*. 57: 10061-1066.
195. Lindquist J.L., Mortensen D.A., 1999. “Ecophysiological characteristics of four maize hybrids and *Abutilon theophrasti*”. *Weed Research*, 39(4): 271-285. Doi: 10.2134/agronj2005.0072
196. Lithourgidis A.S., Valchostergios D.N., Dordas C.A., Damalas C.A., 2011. “Dry matter yield, nitrogen content, and competition in pea-cereal intercropping systems”. *Eur J Agron*. 34:287-294.
197. Lizaso J., Batchelor W., Westgate M., 2003. “A leaf area model to simulate cultivarspecific expansion and senescence of maize leaves”. *Field Crops Research*. 80: 1–17.

198. Loomis R.S., Williams W.M., 1963. "Maximum crop productivity: an estimate". *Crop Sci.* 3: 67–72.
199. Louarn G., Corre-Hellou G., Fustec J., LO-Pelzer E., Julier B., Litrico I., 2010. "Déterminants écologiques et physiologiques de la productivité et de la stabilité des associations graminées-légumineuses. *Innovations Agronomiques.* 11 : 79-99.
200. Lufuluabo M.M., Kizungu R.V., N"kongolo K.K., 2011. "Dynamique foliaire et croissance du maïs : application du modèle « STICS » en conditions tropicales en RD-Congo". *Agronomie Africaine.* 23 (2) : 91-102.
201. Lukombo J.-C.L., Kizungu R.V., Nkongolo K.C.K., Lufuluabo M.M., Tsumbu M., 2013. "Growth and Leaf Area Index Simulation in maize (*Zea mays* L.) under small-scale farm conditions in a sud-saharan African region". *American Journal of Plant Sciences*, 04 (03): 575-583.
202. M'biandoun M., Guibert H., 2004. "Mise au point d'itinéraire technique sous couverture végétale (2<sup>e</sup> année)". *Convention IRAD-FFEM.* IRAD Garoua. 22 p.
203. M'biandoun M., Dongmo A.L., Balarabé O., Nchoutnji I., 2009. "Systèmes de culture sur couverture végétale en Afrique centrale : conditions techniques et socioéconomique pour son développement". *In "Actes du colloque « Savanes africaines en développement : innover pour durer », 20-23 avril 2009" (2010).* L Seiny-Boukar, P Boumard. *Garoua, Cameroun. Prasac, N'Djaména, Tchad ; Cirad, Montpellier, France, cédérom.* 10 p.
204. M'biandoun M., Olina J.P., Nchoutnji I., Kaptchouang E., 2005-2006. "Effet des SCV et recherche d'un précédent à la culture cotonnière sous couverture végétale (1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> année)". *Convention IRAD-ESA,* Garoua. pp. 13, 9.
205. Machet J.M., Laurent F., Chapot J.Y., Dore T., Dutroux A., 1997. "Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères". *In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes".* INRA (Ed.), Les Colloques. 83: 271-288.
206. Maddoni G.A., Otegui M.E., Cirilo A.G., 2001. "Plant population density, row spacing and hybrid effects on maize canopy architecture and light attenuation". *Field Crops Research.* 71: 183-193. Doi: 10.1016/S0378-4290(01)00158-7
207. Magorokosho C., Vivek B., MacRobert J., Tarekegne A., 2010. "Characterization of maize germplasm grown in eastern and southern Africa: Results of the 2009 regional trials coordinated by CIMMYT". Harare, Zimbabwe. CIMMYT. 49p.

208. Malezieux E., Crozat Y., Laurans M., Ozier-Lafontaine H., Rapidel B., De Tourdonnet S., Valantin-Morison M., 2009. "Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review". *Agronomy for Sustainable Development* 29, 43-62.
209. Mandal M.K., Banerjee M., Banerjee H., Pathak A., Das R., 2014. "Evaluation of cereal-legumes intercropping systems through productivity and competition ability". *Asian Journal of Science and Technology*. 5(3): 233-237.
210. Mary B., Recous S., Darwis D., Robin D., 1996. "Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil". *Plant and Soil*. 181: 71-82.
211. Masson P., Bertoni G., 1996. "Essai d'enherbement d'un vignoble méridional à base de trèfle souterrain: synthèse de six années d'expérimentation". In "XI Kolloquium Begrünung im Weibau, Internationaler Arbeitskreis im Weinbau". *Kaltern-Sud Tyrol - Italie, 28-31 août*.
212. Matusso J.M.M., 2014. "Effects of maize (*Zea mays* L.) – soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) intercropping patterns on yields and soil properties in two contrasting sites of Embu and Meru counties, Kenya". Thesis. School of Agriculture and Enterprise Development, Kenyatta University.
213. Mbaye M.S., Kane A., Gueye M., Bassenec C., Ba N., Diop D., Sylla S.N., Noba K., 2014. "Date et densité optimales de semis du niébé (*Vigna unguiculata* L. Walp.) en association avec le mil (*Pennisetum glaucum* L. R. Br.)". *J Appl Biosci*. 76 : 6305-6315.
214. Mbuya K., Nkongolo K.K., Kalonji M.A., Kizungu V.R., 2010. "Participatory selection and characterization of quality protein maize (QPM) varieties in Savanna agro-ecological region of DR Congo". *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 2 (11): 325-332.
215. Mbuya K., 2013. "Sélection, développement, caractérisation et diffusion de variétés de Quality Protein Maize (QPM) en RD Congo : Analyses agronomique, nutritionnelle et génétique". *Thèse. Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo*. Inédit.
216. McGilchrist C.A., 1965. "Analysis of competition experiments". *Biometrics*. 21: 975–985.
217. McKenney D.J., Wang S.W., Drury C.F., Findlay W.I., 1993. "Denitrification and mineralization in soil amended with legumes, grass and corn residues". *Soil Science Society of American Journal*. 57: 1013-1020.



218. McWilliam D.A., Berglund D.R., Endres G.J., 1999. "Growth and Management Quick Guide". *North Dakota State U., U. of Minnesota*. A-1174.
219. Mead R., Willey R.W., 1980. "The concept of a land equivalent ratio and advantages in yields from intercropping". *Experimental Agriculture*. 16 (3): 217-228.
220. Midya A., Bhattacharjee K., Ghose S.S., Banik P., 2005. "Deferred seeding of Blackgram (*Phaseolus mungo* L.) in rice (*Oriza sativa* L.) field on yield advantages and smothering of weeds". *J. Agronomy & Crop Science*. 191: 195-201.
221. Mignolet C., 2003. "30 ans d'évolution des pratiques agricoles sur le bassin de la Seine". In "Séminaire AESN-SAGEP. 24-25 juin". *Fontainebleau*. 1-7.
222. Minor H.C., 1982. "Plant spacing in soybean production". In J "Proc. Conf. Soybean Seed Quality and Stand Establishment" (éds). B. Sinclair, J.A. Jackobs. *Colombo, Sri Lanka, 25-31 janv. 1981, INTSOY Ser. 22. Urbana-Champaign, IL, Etats-Unis, INTSOY et University of Illinois*. 83-88.
223. Mitchell J.P., Peters D.W., Shennan C., 1999. "Changes in Soil Water Storage in Winter Fallowed and Cover Cropped Soils". *Journal of Sustainable Agriculture*. 15 (2/3): 19-31.
224. Mollier A., 1999. "Croissance racinaire du maïs (*Zea mays* L.) sous déficience en Phosphore. Etude expérimentale et modélisation". Thèse de doctorat. Université de Paris XI Orsay. Paris, France. 200 p.
225. Mongi H.O., Uriyo A.P., Sudi Y.A., Singh B.R., 1976. "An appraisal of some intercropping methods in terms of grain yield, response to applied phosphorus and monetary return from maize and cowpeas". *East Afr Agric For J*. 42: 66-70.
226. Monteith J.L., 1972. "Solar radiation and productivity in tropical ecosystems". *Journal of Applied Ecology*. 9 (3): 747-766.
227. Monteith J.L., 1977. "Climate and the efficiency of crop production in Britain". *Phil. Trans. R. Soc., London*, B 281: 277-294.
228. Morel K., 2016. "Viabilité des microfermes maraîchères biologiques. Une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation. Sciences agricoles". Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay, France. Inédit.
229. Morin J., Van Winkel J., 1996. "The Effect of Raindrop Impact and Sheet Erosion on Infiltration Rate and Crust Formation". *Soil Scienc of Society American Journal*. 60: 12223-1227.

230. Mpeperekwi S., Pompi I., 2002. "Promoting new BNF technologies among smallholder farmers: A success story from Zimbabwe". In "Grain legumes and green manures for soil fertility in the southern Africa: Taking stock of progress" (2003). S.R. Waddington. *Proceeding of a Conference, Leopard Rock Hotel, Vumba, Zimbabwe. 8-11 October 2002. SoilFert Net and CIMMYT-Zimbabwe*, Harare, Zimbabwe.
231. Mpeperekwi S., Javaheri F., Davis P., Giller K.E., 2000. "Soyabean and sustainable agriculture promiscuous soyabean in southern Africa". *Field Crops Research*. 65: 137-149.
232. Mucheru-Muna M., Pypers P., Mugendi D., Kung'u J., Mugwe J., Merckx R., Vanlauwe B., 2010. "A staggered maize-legume intercrop arrangement robustly increases crop yields and economic returns in the highlands of central Kenya". *Field Crops Research*. 115: 132-139.
233. Muoneke C.O., Ogwuche M.A.O., Kalu B.A., 2007. "Effect of Maize Planting Density on the Performance of Maize/Soybean Intercropping System in a Guinea Savannah Agro-ecosystem". *African Journal of Agricultural Research*. 2(12): 667-677.
234. Mutsaers H.J.W., Mbouemboue P., Boyomo M., 1981b. "Traditional food crop growing in the Yaounde area (Cameroon). Pt. II Crop Associations, yield and fertility aspects". *Agro-Ecosystems*. 6: 289-303.
235. Mutsaers, H.J.W., Mbouemboue, P., Boyomo, M., 1981a. "Traditional food crop growing in the Yaounde area (Cameroon). Pt. I Synopsis of the system". *Agro-Ecosystems*. 6: 273-287.
236. Muyayabantu G.M., 2017. "La culture du maïs sur les oxisols en République Démocratique du Congo". *Edition de l'Harmattan*, Paris, France. 236 p.
237. Muyayabantu G.M., Kadiata B.D., Nkongolo K.K., 2013. "Assessing the Effects of integrated Soil Fertility Management on Biological Efficiency and Economic Advantages of Intercropping Maize (*Zea Mays* L.) and Soybean (*Glycine Max* L.) in DR Congo". *American Journal of Experimental Agriculture*. 3(3): 520-541.
238. N'tare B.R., William J.H., 1992. "Responses of cowpea cultivars to planting pattern and date of sowing in intercrops with pearl millet in Niger". *Experimental Agriculture*. 28: 41-48.
239. Natarajan M., Willey R., 1980a. "Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 1. Growth and yield". *J. Agric. Sci.* 95: 51-58.

240. Natarajan M., Willey R., 1980b. "Sorghum-pigeonpea intercropping and the effects of plant population density. 2. Resource use". *J. Agric. Sci.* 95: 59-65.
241. Natarajan M., Willey R., 1980c. "Sorghum – pigeon pea intercropping and the effect of plant population density. 2, Resource use". *Journal. Agricultural Science.* 95: 87–98.
242. Naudin C., Corre-Hellou G., Pineau S., Crozat Y., Jeuffroy M.-H., 2010. "The effect of various dynamics of N availability on winter pea-wheat intercrops: Crop growth, N partitioning and symbiotic N<sub>2</sub> fixation". *Field Crops Research.* 119: 2-11
243. Naudin C., Corre-Hellou G., Voisin A.-S., Oury V., Salon C., Crozat Y., Jeuffroy M.-H., 2011. "Inhibition and recovery of symbiotic N<sub>2</sub> fixation by peas (*Pisum sativum* L.) in response to short-term nitrate exposure". *Plant and Soil.* 346: 275-287.
244. Nel P.C., 1975. "Mixed cropping of lupins and winter cereals. 4. Seeds yield and quality under field conditions". *J. Agric. Sci.* 8: 219-237.
245. Nelson S.C., Robichaux R.H., 1997. "Identifying plant architectural traits associated with yield under intercropping implication of genotype". *Cropping system interactions plant breeding.* 16: 163–170.
246. Njoroge J.M., Waithaka K., Chweya J.A., 1993. "Effects of intercropping young plants of the compact Arabica coffee hybrid cultivar Ruiru 11 with potatoes, tomatoes, beans and maize on coffee yields and economic returns in Kenya". *Experimental Agriculture.* 29 (3): 373-377.
247. Nnadi L.A., Haque I., 1988. "Les légumineuses fourragères dans les systèmes africains d'agriculture mixte". *Bulletin du CIPEA* 30. Addis-Abeba (Ethiopie). 12–22.
248. Nolte C., Tiki-Manga T., Badjel-Badjel S., Gockowski J., Hauser S., 2005. "Groundnut, maize and cassava yields in mixed-food crop fields after calliandra tree fallow in southern Cameroon". *Experimental Agriculture.* 41: 21-37.
249. Nyembo K.L., 2010. "Augmentation du rendement du maïs par l'exploitation de l'effet hétérosis des hybrides produits au Katanga, République Démocratique du Congo". *Thèse de doctorat. Faculté des Sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi.* 157p.
250. Ofori F., Stern W.R., 1987. "Cereal-legume intercropping systems". *Adv. Agron.* 41: 41-90.

251. Okigbo B.N., Greenland D.J., 1976. "Intercropping systems in tropical Africa". In "Multiple cropping". ASA Special Publication. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin. 27: 63-102.
252. Olufajo O.O., Ogungbile A.O., Ahmed B., 1997. "On-farm testing of variety and NPK Fertilization for maize-cowpea mixture in the Nigeria Savanna". In "Technology options for sustainable agriculture in Sub-Saharan Africa" (Eds). T.Sedgo, M. Oueuedraogo. *The Semi-Arid Food Grain Research and Development agency (SAFGRAD) of the scientific, technical and research commission of OAU*, Oueuedraogo, Burkina Faso. 235-246.
253. Olufemi O., Pitan R., Odebisi J.A., 2001. "The effects of intercropping with maize on the level of infestation and damage of pod-sucking bugs in the cowpea". *Crop protection*. 20: 367- 372.
254. Osunde A.O., Tsado P.A., Bala A., Sangina N., 2004. "Productivity of a maize-promiscuous soybean intercrops as affected by fertilizer in the southern Guinea savanna zone of Nigeria". *West African Journal Applied Ecology*. 5: 51-62.
255. Owens L.B., Edwards W.M., 1993. "Tillage studies with a corn-soybean rotation: surface runoff chemistry". *Soil Science Society of American Journal*. 57: 1055-1060.
256. Ozier-Lafontaine H., Lafolie F., Bruckler L., Tournebize R., Mollier A., 1998. "Modelling competition for water in intercrops: theory and comparison with field experiments". *Plant and Soil*. 204: 183-201.
257. Paliwal R.L., Granados G., Violic A.D., Lafitte H.R., Marathe J.P., 2002. "Le maïs en zones tropicales: amélioration et production". *FAO*, Rome. 256 p.
258. Patra B.C., Mandal B.B., Mandal B.K., Padhi A.K., 1999. "Suitability of maize (*Zea mays*) based intercropping systems". *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 69 (11): 759-762.
259. Poggio S.L., 2005. "Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley". *Agric. Ecosyst. Environ*. 109: 48-58.
260. PRAGMA, 1987. "Région du Kivu : Etude Provinciale pour la Planification Agricole". *Projet USAID/PRAGMA. Bureau de planification agricole. Département de l'Agriculture, Services d'Etudes et de Planification*. Kinshasa.
261. Prasad R.B., Brooks R.M., 2005. "Effects of varying maize density on intercropped maize and soybeans in Nepal". *Exp. Agric*. 41: 365-382.

262. Prévot L., Aries F., Monestiez P., 1991. "Modélisation de la structure géométrique du maïs". *Agronomie, Bioclimatologie, EDP Sciences*. 11 (6) : 491-503.
263. Probert M.E., Carberry P.S., McCown R.L., Turpin J.E., 1998. "Simulation legume-cereal systems using APSIM". *Aust. J. Agric. Res.* 49: 317–327.
264. Puckridge D.W., French R.J., 1983. "The annual legumes pasture in cereal ley-farming systems of southern Australia: a review". *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 9: 229-67.
265. Rao M.R., Mathuva M.N., 2000. "Legumes for improving maize yields and income in semiarid Kenya". *Agric. Ecosyst. Environ.* 78: 123- 137.
266. Raunet M., Seguy L., Fovet Rabots C., 1998. "Semis direct sur couverture végétale permanente du sol : de la technique au concept". *Document obtenu sur le site Cirad du réseau 23-28 mars 1998, Anae, Cirad, Fafala, Fifamanor, Fofifa, Tala. Montpellier, France, Cirad, collection Colloques*. 658 p. <http://agroecologie.cirad.fr>.
267. REAFOR, 2008. "Première session du Comité Scientifique et Technique (CST) du 15 au 17 Janvier 2008. Deuxième session du Comité de Pilotage du Projet (CPP) du 18 au 19 Janvier 2008. Compte-rendu". *Cassiopée*, Kinshasa, République Démocratique du Congo. 217 p.
268. Reddy K.C., Visser P.L., Klaij M.C., Renard C., 1994. "The effects of sole and traditional intercropping of millet and cowpea on soil and crop productivity". *Exp Agric.* 30: 83- 88.
269. Rezaei S.A., Gilkes R.J., Andrews S.S., Arzani H., 2005. "Soil quality assessment in semiarid rangeland in Iran". *Soil Use and Management*. 21: 402-409.
270. Roberge G., Toutain B., 1999. "Cultures fourragères tropicales". *CIRAD*, Montpellier, France. 3 p.
271. Rollin D., 1997. "Quelles améliorations pour les systèmes de culture du Sud-ouest malgache ?". *Agriculture et développement*. 16 : 57-72.
272. Roose E., 1984. "Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux". *Machine Agricole Tropicale*. 87 : 24-36.
273. Ruget F., Bonhomme R., Chartier M., 1996. "Estimation simple de la surface foliaire de plantes de maïs en croissance". *Agronomie*. 16 : 553-562.
274. Ruget F., 1991. "Présentation d'une méthode simple d'estimation de la contribution des réserves pour le remplissage des grains chez le maïs". *Elsevier/INRA, Agronomie*. 505-510.

275. Sadio S., 2008. “Le stylo, plante révolutionnaire pour l’agriculteur congolais. La Voix du Congo Profond, le magazine d’un Congo en marche”. *Trimestriel N°3. Ed. Centre agronomique et Vétérinaire Tropical de Kinshasa*. 8-10.
276. Salez P., 1988. “Compréhension et amélioration de systèmes de cultures associées céréale-légumineuse au Cameroun”. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France. Inédit.
277. Sanderson J.B., Daynard T.B., Tollenaar M., 1981. “A mathematical model of the shape of corn leaves”. *Can. J. Plant Sci.* 61: 109-1011.
278. Sandretto C., 2001. “Conservation tillage firmly planted in US agriculture”. *Agricultural Outlook*. 5-6.
279. Sanginga N., Woomer P.I., 2009. “Integrated soil fertility management in Africa: Principles, practices, and developmental processes”. *Nairobi, TSBF-CIAT*. 263 p.
280. Sanginga N., Okogun J.A., Vanlauwe B., Diels J., Carsky R.J., Dashiell K., 2001. “Nitrogen contribution of promiscuous soybeans in maize-based cropping systems”. *SSSA Special Publication*. 58: 157-177.
281. Sassenrath-Cole G.F., 1995. “Dependence of canopy light distribution on leaf and canopy structure for two cotton (*Gossypium*) species”. *Agriculture and Forest Meteorology*. 77: 55-72. Doi: 10.1016/0168-1923(95)02238-S
282. Schroth G., Salazar E., Da Silva Jr J.P., 2001. “Soil nitrogen mineralization under tree crops and legume cover crop in multi-strata agroforestry in central Amazonia: spatial and temporal patterns”. *Experimental Agricultural*. 37: 253-267.
283. Schulze E.D., 1982. “Plant life forms and their carbon, water and nutrient relations”. In “Encyclopedia of plant physiology” (Eds). O.L. Lang, P.S. Nobel, C.B. Osmond, H.Ziegler. *Physiological plant ecology II, New Series. Springer-Verlag, Berlin*. 12(B): 615-676.
284. Schwinning S., Weiner J., 1998. “Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants”. *Oecologia*. 113: 447-455.
285. Scopel E., 1994. “Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique : Intérêt de cette technique pour améliorer l’alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière”. PhD, Institut National Agronomique Paris-Grignon, France, 334 p.

286. Scopel E., Chavez-Guerra E., Arreola-Tostado J.M., 1999. "Le semis direct avec paillis de résidus dans l'ouest Mexicain: une histoire de l'eau ?" *Agriculture et développement*. 21: 71-86.
287. Séguy L., Bouzinac S., Maeda E., Maeda M., 1998. "Large-scale mechanized direct drilling of cotton in Brazil". *The ICAC Recorder, technical information section*. 16 (1): 11-17.
288. Seguy L., Bouzinac S., Maronzzi C., 2001. "Système de culture et dynamique de la matière organique". [http // agroecologie. Cirad. fr./PDF/postlsfr. Pdf](http://agroecologie.cirad.fr/PDF/postlsfr.Pdf).
289. Seguy L., Husson O., Charpentier H., Bouznac S., Michellon R., Chabanne A., Boulakia S., Tivet F., Naudin K., Enjalric F., Ramaroson I., Rakotondramanana, 2009. "Principes et intérêts du semis direct : Principes et fonctionnement des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture permanente. Manuel pratique du semis direct à Madagascar". *Edition GSDM/CIRAD*. 1(1) : 32 p.
290. Seran T.H., Brintha I., 2010. "Review on maize based intercropping". *Journal of Agronomy*. 9 (3): 135-145.
291. Serpantié G., 2009. "L' « agriculture de conservation » à la croisée des chemins (Afrique, Madagascar)". *Vertigo–La revue en sciences de l'environnement*. 9(3) : 1-21.
292. Sesekebembe C.K., 1985. "Cowpes as a mixed crop". *Trop. Grain legume bulletin*. 30: 2–8.
293. Seymour M., Kirkegaard J.A., Peoples M.B., White P.F., French R.J., 2012. "Break-crop benefits to wheat in Western Australia—insights from over three decades of research". *Crop and Pasture Science*. 63: 1–16.
294. Shibles R.M., Weber C.R., 1996. "Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns". *Crop Sci*. 6: 55-59.
295. Shumba E.M., Dhiwayo H.H., Mukoko O.Z., 1990. "The potential of maize-cowpea intercropping in low rainfall areas of Zimbabwe". *Zimbabwe J of Agric Res*. 28: 33-38.
296. Silwana T.T., Lucas E.O., 2002. "The effect of planting combinations and weeding and yield of component crops of maize/bean and maize/pumpkin intercrops". *J. Agric Sci*. 138: 193-200.
297. Sinclair T.R., Seligman N.A.G., 1996. "Crop modelling: from infancy to maturity". *Agronomy Journal*. 88: 698-703.

298. Singh B.B, Chambliss O.L., Sharma B., 1997. "Recent advances in cowpea breeding". In "Advances in cowpea research" (Eds). B.B. Singh, D.R. Mohan Raj, K.E. Dashiell, L.E.N. Jackai. *Co-publication of International Institute of Tropical Agricultural (IITA) and Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS) IITA*, Ibadan, Nigeria. 30-49.
299. Sinoquet H., Rakocevic M., Varlet-Grancher C., 2000. "Comparison of models for daily light partitioning in multispecies canopies". *Agricultural and Forest Meteorology*. 101: 251-263.
300. Sivakumar M.V., Virmani S., 1980. "Growth and resource use of maize, pigeonpea and maize/pigeonpea intercrop in an operational research watershed". *Exp. Agric.* 16: 377-386.
301. Sivakumar M.V., Virmani S., 1984. "Crop productivity in relation to interception of photosynthetically active radiation". *Agric. Forest Meteorology*. 31: 131-141.
302. Smith N.J., 1991. "Predicting radiation attenuation in stands of Douglas-fir". *Forest Science*. 37:1213-1223.
303. Snaydon R.W., Satorre E.H., 1989. "Bivariate diagrams for plant competition data: modifications and interpretation". *Jour. Appl. Ecology*. 26: 1043-1057.
304. Spritters C.J.T., Van Keulen H., Van Kraalingen, 1989. "A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87". In "Simulation and systems management in crop protection" (Eds). R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. Van Laar. *Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen*, The Netherlands. 32: 147-181.
305. Steele W.M., Mehra K.L., 1980. "Structure, evolution and adaptation to farming system and environment in *Vigna*". In "Advances in legumes science" (Eds). R.J. Summerfield, A.H. Bunting. *HMSO, London*, UK. 393-404
306. Steiner K.G., 1982. "Intercropping in Tropical Smallholder Agriculture with Special Reference to West Africa". *Schriftenreihe der GT2, Eischbon*, Germany. 137: 303 p.
307. Stirling C., Williams J., Black C., Ong C., 1990. "The effect of timing of shade on development, dry matter production and light-use efficiency in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) under field conditions". *Aust. J. Agric. Res.* 41: 633-644.
308. Stoop W.A., Staveren J.P.V., 1986. "Effect of cowpea in cereal rotations on subsequent crop yields under semi arid condition in upper volta". In "Biological nitrogen fixation technology for tropical agriculture" (Eds). P.C. Graham and S.C.



- Harns. *Centro-International de Agriculture Tropical (CIAT)*. Cali, Colombia. 653–657.
309. Tan C. S., Drury C.F., Gaynor J.D., Welacky T.W., Reynolds W.D., 2002. “Effect of tillage and water table control on evaporation, surface runoff, tile drainage and soil water content under maize on a clay loam soil”. *Agricultural Water Management*. 54: 173-188.
310. Tardieu F., Granier C., Muller B., 1999. “Modelling leaf expansion in a fluctuating environment: are changes in specific leaf area a consequence of changes in expansion rate?” *New Phytologist*. 143: 33-43.
311. Terao T., Watanabe I., Matsunaga R., Hakoyama S., Singh B.B., 1997. “Agro physiological constraints in intercropped cowpea: an analysis”. In “Advances in cowpea research” (Eds). B.B. Singh, D.R. Mohan Raj, K.E. Dashiell, and L.E.N. Jackai. *Co-publication of International Institute of Tropical Agriculture (IITA) and Japan International Research Center for Agricultural Sciences (JIRCAS)*. IITA, Ibadan, Nigeria. 129-140p.
312. Thurston D.H., 1997. “Slash and mulch systems. Sustainable methods for tropical agriculture”. *Westview Press, London, United Kingdom*, 196 p.
313. Tian G., 1998. “Effet of soil degraation on leaf decomposition and nutrient release under humid tropical conditions.” *Soil Science*. 163(11): 897-906.
314. Tilman D., Cassman K.G., Matson P.A., Naylor R., Polasky S, 2002. “Agricultural sustainability and intensive production practices”. *Nature (London)*. 418 (6898): 671-677.
315. Tofinga M.P., Paolini R., Snaydon R.W., 1993. “A study of root and shoot interactions between cereals and peas in mixtures”. *The Journal of Agricultural Science*. 120: 13-24.
316. Trenbath B.R., 1976. “Plant interactions in mixed crop communities”. In “Multiple cropping” (Eds). R.I. Papendick, P.A. Sanchez, G.B. Triplett. *American Society of Agronomy Special Publication*. 129-170.
317. Trenbath B.R., 1993. “Intercropping for the management of pests and diseases”. *Field Crops Res*. 34: 381-405.
318. Tsay J.S., Fukai S., Wilson G.L., 1989. “Growth and yield of cassava as influences by intercropped soybean and by nitrogen application”. *Field Crops Res*. 21 (2): 83-94.

319. Tshiabukole J.P.K., 2018. "Evaluation de la sensibilité aux stress hydriques du maïs (*Zea mays* L.) cultivé dans la savane du sud-ouest de la RD Congo, cas de Mvuazi". Thèse de doctorat. Université Pédagogique National, Faculté des Sciences Agronomiques. Inédit.
320. Tshiabukole J.P.K., Vumilia R.K., Khonde G.P., Lukeba J.C.L., Kankolongo A.M., Djamba A.M., Nkongolo K.K.C., 2019. "Simulation of growth and leaf area index of quality protein maize varieties in the southwestern savannah region of the DR Congo". *American Journal of Plant Science*. 10: 976-986. <https://doi.org/10.4236/ajps.2019.106070>
321. Tshiabukole J.P.K., Khonde G.P., Muku M., Vumilia R.K., Lunekua R.K., Kankolongo A.M., 2016. "Influence of Climate Variability on Seasonal Rainfall Patterns in South-Western DR Congo". *Open Access Library Journal*. 3: e2952. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1102952>
322. Tsubo M., Walker S., Ogindo H.O., 2005. "A simulation model of cereal-legume intercropping systems for semi-arid regions: I. Model development". *Field Crops Research*. 93 (1): 10-22.
323. Tsubo M., Walker S., 2004. "Shade effects on *Phaseolus vulgaris* L. intercropped with *Zea mays* L. under wellwatered conditions". *Agronomy Crop Sci*. 190: 168-176.
324. Tsubo M., Walker S., Mukhala E., 2001. "Comparisons of radiation use efficiency of mono-/inter-cropping systems with different row orientations". *Field Crops Res*. 71:17-29.
325. Tuner D.P., Acker S.A., Means J.E., Garman S.L., 2000. "Assessing alternative allometric algorithms for estimating leaf area of Douglas-fir trees and stands forest". *Ecol. Manag*. 126: 61-76.
326. Tungani J.O., Mukhwana E., Woomer P.L., 2002. "Mbili is Number 1: A Handbook for Innovative Maize-Legume Intercropping". *SACRED Africa, Bungoma, Kenya*.
327. Useni S.Y., Mwema L.A., Musambi L., Chinawej M.M.D., Nyembo K.L., 2014. Des faibles doses d'engrais minéraux peuvent permettre l'augmentation du rendement du maïs cultivé densément ? *Journal of Applied Biosciences*. 74 : 6131-6140.
328. Uzoh I.M., Igwe C.A., Okebalama C.B., Balalola O.O., 2019. "Legume-maize rotation effect on maize productivity and soil fertility parameters under selected agronomic practices in a sandy loam soil". *Scientific reports*. 9: 8539. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43679-5>

329. Valentin A., Kiasala L.R., Mbanda E., Ntony J., 2009. “Carte GPS du Centre de Recherche Agronomique de MVUAZI”. *INERA/Province du Kongo Central (ex Bas-Congo)*.
330. Van Asten P.J.A., Twagirayezu P., Gaidashova S., 2007. “Effect of guatamala grass (*Tripsacum laxum*) mulch applications on soil moisture conservation and soil fertility status”. In “Proceedings of ISAR National Conference”, Kigali, Rwanda. 26-27.
331. Van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L., Goudriaan J., 2003. “On approaches and applications of the Wageningen crop models”. *Europ. J. Agron.* 18: 201– 234.
332. Vancutsem C., Pekel J.-F., Evrard C., Malaisse F., Defourny P., 2006. “Carte de l’occupation du sol de la République Démocratique du Congo au 1 : 3 000 000. Notice de la carte de l’occupation du sol de la RDC 4”. *Presses Universitaires de Louvain, Janvier 2006. UCL Geomatics (Louvain-la-Neuve, Belgique)*.
333. Vandermeer J., 1989. “The ecology of intercropping”. *Cambridge university press, Cambridge*.
334. Varlet-Grancher C., Bonhomme R., Sinoquet H., 1993. “Crop structure and microclimate. Characterization and applications”. *INRA Éditions, Paris, France*.
335. Varlet-Grancher C., Gosse G., Chartier M., Sinoquet H., Bonhomme R., Allirand J.M., 1989. “Mise au point : rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal”. *Agronomie.* 9 : 419-39.
336. Vazin F., Madani A., Hassanzadeh M., 2010. “Modeling light interception and distribution in mixed canopy of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) in competition with corn (*Zea mays*)”. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca.* 38(3): 128-134.
337. Violic A.D., 2002. “Gestion intégrée de la culture”. In “Le maïs en zones tropicales : amélioration et production” (2002). R.L. PALIWAL. *Food & Agriculture Org.* 382 p.
338. Watiki J.M., Fukai S., Banda J.A., Keating B.A., 1993. “Radiation interception and growth of maize/cowpea intercrop as affected by plant density and cowpea cultivar”. *Field Crops Res.* 35: 123- 133.
339. Watson D.J., 1947. “Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years”. *Annals of Botany.* 11: 41–76.
340. Weigelt A., Jolliffe P., 2003. “Indices of plant competition”. *J. Ecol.* 91: 707-720.

341. Weiss M., 1998. "Développement d'un algorithme de suivi de la végétation à large échelle". PhD thesis, Université de Nice Sophia-Antipolis.
342. Welles H.G., 1985. "Teosynte : the closest relative of maize revisable". *Maydica*. 30: 209-223.
343. Willey R.W., Natarajan M., Reddy M.S., Rao M.R., Nambiar P.T.C.M., Kannaiyan J., Bhatnagar V.S., 1983. "Intercropping Studies with Annual Crops". In "Better Crop for Food" (eds). J. Nugent, M. O'Connor. *Pitman Co.*, London. 83-100.
344. Willey R., 1979a. "Intercropping – its importance and research needs. 1. Competition and yield advantages". *Field Crop Abstr.* 32: 1-10.
345. Willey R., 1979b. "Intercropping – its importance and research needs. 2. Agronomy and research needs". *Field Crop Abstr.* 32: 73-85.
346. Willey R.M., 1990. "Resources use in intercropping system". *Agriculture, Water Management*. 17: 25–231.
347. Willey R.W., Osiru, D.S., 1972. "Studies on mixtures of maize and beans (*Phaseolus vulgaris*) with particular references to plant population". *J. Agric. Sci. (Camb.)*. 79: 519–529.
348. Willey R.W., Rao, M.R., 1980. "A competitive ratio for quantifying competition between intercrops". *Experimental Agriculture*. 16: 117–125.
349. Woomer P.L., 2007. "Costs and returns of soil fertility management options in Western Kenya". In, "Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities" (Eds.). A. Bationo, B. Waswa, J. Kihara, J. Kimetu. *Springer*, The Netherlands. 881–890.
350. Woomer P.L., Martin A., Albrecht A., Resck D.V.S, 1994. "The importance and Management of Soil Organic Matter in the Tropics". *The Biological Management of Tropical Soil Fertility. JWSC. TSBFP*: 47-80.
351. Xiaolei S., Zhifeng W., 2002. "The optimal leaf area index for cucumber photosynthesis and production in plastic green house". *ISHS Acta Horticulturae*, (XXVI International Horticultural Congress). 633 p.
352. Yang Y., Timlin D.J., Fleisher D.H., Kim S.H., Quebedeaux B., Reddy V.R., 2009. "Simulating leaf area of corn plants at contrasting water status". *Agricultural and Forest Meteorology*. 149: 1161-1167.

353. Yang H., Dobermann A., Lindquist J.L., Walters D.T., Arkebauer T.J., Cassman K.G., 2004. “Hybrid-maize-a maize simulation model that combines two crop modeling approaches”. *Field Crops Research*. 87: 131–215.
354. Yilmaz S., Atak M., Erayman M., 2008. “Identification of advantages of maize-legume intercropping over solitary cropping through competition indices in the East Mediterranean region”. *Turk J. Agric. For.* Ed. TUBITAK. 111-119.
355. Yusuf A.A., Iwuafor E.N.O., Abaidoo R.C., Olufajo O.O., Sanginga N., 2009. “Grain legume rotation benefits to maize in the northern Guinea savanna of Nigeria: fixed-nitrogen versus other rotation effects”. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 84: 129-139. DOI 10.1007/s10705-008-9232-9.

## Références webographiques

1. FAO, 2017: “Conservation agriculture”. <http://www.fao.org/ag/ca/fr/>
2. Millenium Ecosystem Assessment, 2005. “Ecosystem Assessment synthesis report”. [En ligne] [http://www.millenumassessment.org /en/Products.Synthesis.aspx](http://www.millenumassessment.org/en/Products.Synthesis.aspx), 219p.
3. SSSA, 2006. “Soil Science Society of America”. Disponible sur [www.soils.org](http://www.soils.org) (consulté le 2 août 2014).

## **Annexes**



# Evaluation of the Association and Rotation of Maize with Legumes, in Direct Sowing in the Democratic Republic of Congo

Gertrude Khonde Pongi<sup>1</sup>, Jean Pierre Tshiabukole Kabongo<sup>1\*</sup>, Amand Kankolongo Mbuya<sup>1</sup>, Stefan Hauser<sup>2</sup>, Antoine Djamba Mumba<sup>3</sup>, Roger Vumilia Kizungu<sup>4</sup>, Constant Nkongolo Kabwe<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Programme National Maïs, INERA, Mvuazi, DRC

<sup>2</sup>IITA, Ibadan, Nigeria

<sup>3</sup>Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, DRC

<sup>4</sup>Direction Scientifique, biométrie et expérimentation, Université de Kinshasa, Kinshasa, DRC

<sup>5</sup>Département des Sciences Biologiques, Université Laurentienne, Sudbury, Ontario, Canada

Email: \*jpkabon2005@gmail.com

**How to cite this paper:** Pongi, G.K., Kabongo, J.P.T., Mbuya, A.K., Hauser, S., Mumba, A.D., Kizungu, R.V. and Kabwe, C.N. (2020) Evaluation of the Association and Rotation of Maize with Legumes, in Direct Sowing in the Democratic Republic of Congo. *Open Access Library Journal*, 7: e6522.

<https://doi.org/10.4236/oalib.1106522>

**Received:** June 13, 2020

**Accepted:** September 14, 2020

**Published:** September 17, 2020

Copyright © 2020 by author(s) and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

A study was carried out to find, in the intercropping system, the combination for optimizing maize production put into the direct seeding mulch-based cropping systems (DMC). Eight varieties of maize and two legumes were put into intercropping and rotated systems respectively in first and second season, following a factorial system with four replicates. In the second season, maize was sowed on mulch from sole crops and intercrops of first season. The results showed that in the first and second seasons, maize sole crop and maize on maize + cowpea mulch were more productive (2350.19 kg·ha<sup>-1</sup> and 2974.82 kg·ha<sup>-1</sup> respectively) than maize on maize + soybean mulch. But, Mudishi 3-soya and 07SADVE variety on maize + cowpea mulch obtained the greatest benefit for the various association systems (cost/benefit ratio = 4.04 and 2.01 respectively). Maize varieties have doubled, tripled or quadrupled their yields when rotated with cowpea and soybean, and the high yields observed in this study resulted in significant benefits in increasing their ratios whether in combination or in rotation. These new agricultural production techniques could free the farmer from tillage by leaving the cover plants to ensure equivalent work (DMC).

## Subject Areas

Agricultural Science

## Keywords

Maize, Soybean, Cowpea, Intercropping, Mulch, INERA, DR Congo



## 1. Introduction

Intercropping was defined as an agricultural practice of growing two or more crops in the same space at the same time. Increasing productivity per unit area can be an important reason for growing two or more crops together [1]. It can be seen as practices application of diversification, competition and facilitation of species in cropping systems [2]. Cereal-legume intercropping plays an important role in food production worldwide. Crop intercropping is commonly practiced because of various advantages such as greater yield stability [3] [4], when one crop fails, the other can still give a reasonable yield [5], a higher efficient land occupation, a high capacity for competition against weeds; legumes can cover their need for atmospheric nitrogen (N<sub>2</sub>) [6] and thus is less competitive for soil nitrogen [4] [7] [8] [9].

In the Democratic Republic of Congo, in general, and in the Province of Central Kongo in particular, the production of legume residues remains low as a result of the export of organic matter out of the field and the practice of waste incineration. According to [10], research that had been carried out for more than 30 years [11] [12] had shown the causes and factors of the physical and chemical degradation of new land; Their findings had suggested a number of locally capable methods of delaying degradation, limiting losses, and even restoring acceptable fertility potential. In the current cropping system, a crop rotation system with the integration of cover crops has also been proposed in addition to the combination of crops, In order to solve the problems of depletion of cultivated soil [13] [14]. Studies conducted in the world have shown that the direct seeding mulch-based cropping system (DMC) ensures a good productivity of the cultivated surfaces and gives many advantages in the soil management [15] [16] [17]. To be successful, these cropping systems must produce high biomass, particularly in the first years of direct seeding.

Although the effects of mulch on the soil are well known [18] [19], but with a low protection, one may wonder what the real impact of this technique on rainfed maize yield and on the evolution of long-term fertility in our fields. Information on the associations and rotations of the different varieties of maize and pulses is very poor and does not allow sufficient information on these crops.

This study aims to acquire knowledge on the response of maize crops in association and rotation with food legumes used as cover crops in order to determine the type of cover to be used in order to better evaluate their effects on maize yield.

## 2. Material and Method

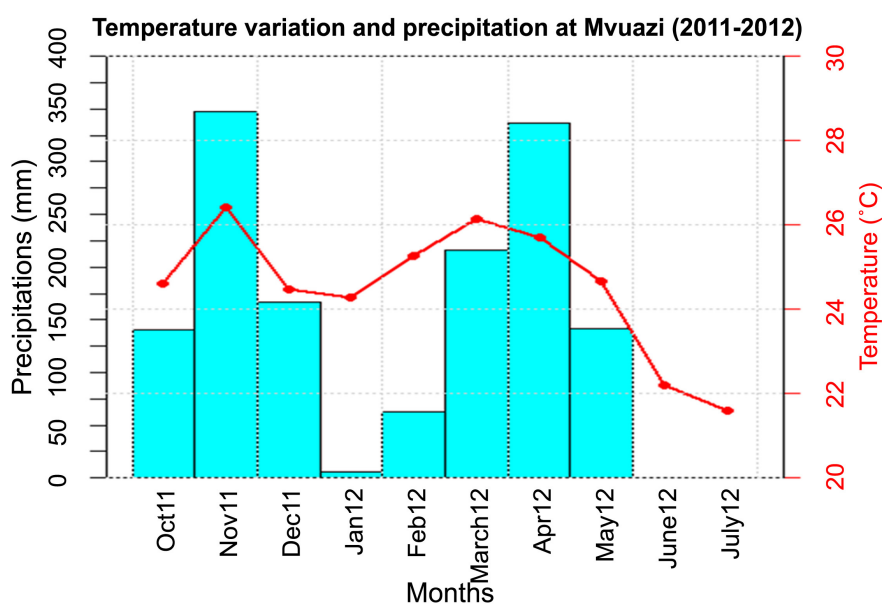
### 2.1. Experimental Site, Description and Characterization of Soil

This study was conducted at the Mvuazi Research Station during the 2011-2012 cropping season. Mvuazi is in the Kongo Central province of DRC with longitude 14°54'E, latitude 5°21'S and altitude 470 m. The soil of Mvuazi belongs to

the Sudano-Guinean climate zone of the AW4 type [20]. This soil is characterized by low organic matter content and low water holding capacity resulting in low nitrogen availability. This soil valley develops a humiferous horizon 15 - 25 cm thick, black (fresh) or brownish (dry) with a well-pronounced subangular or grumulous structure. And this horizon is often overhauled by crops.

Mean annual temperatures vary between 24°C and 30°C with rainfall ranging from 800 to 1200 mm. The climatic data recorded during the experimental period are presented in **Figure 1**.

In this study, soil samples were collected and were analyzed to determine the NPK content and pH. These analyzes were made at the laboratory of Crop Nutrition Laboratory Services on July 20, 2011, and gave as contents: 0.21% for nitrogen N, 14 ppm for phosphorus P, 105 ppm for potassium K and a pH 5.76. The selected chemical and physical parameters for soils at experimental site are presented in **Table 1**.



**Figure 1.** Temperature variation and precipitation amount during the study period.

**Table 1.** Selected chemical and physical parameters for soils at experimental site.

Parameters (unit)	Soil pH	P1 (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	Mn (ppm)	S (ppm)	Cu (ppm)	B (ppm)
Results	5.76	14	105	1505	229	55	23	12.30	0.21
Guide Low	6.00	30	268	1651	165	100	20	2.00	1.00
Guide high	7.00	100	537	2064	264	250	200	10.00	2.00
Parameters (unit)	Zn (ppm)	Na (ppm)	Fe (ppm)	CEC (meq/100g)	OC (meq/100g)	Silt (%)	Sand (%)	Clay (%)	N (%)
Results	7.98	47	194	13.76	4.07	13	49	39	0.21
Guide Low	4.00	0	150	15.00	-	30	30	20	0.20
Guide high	20.00	158	350	30.00	-	50	55	55	0.50

## 2.2. Experimental Design and Plant Material

The trial was conducted under the split-plot design with 4 replications and the main factor consisted to intercropping and rotation treatments and the second factor was maize variety. Eight maize varieties (Mudishi-1, Mudishi-3, 07 SADVE, 08 SADVE1, 09 SADVE-F2, ZM523, VP0538 and Samaru) From CIMMYT/IITA and INERA were sown at a spacing of 1 m × 0.25 m in sole crop and intercrop with a density of 80,000 plants·ha<sup>-1</sup>, according to [21], in the main plots of 6 m × 4 m of sizes. Soybean (Vuangi variety) and Cowpea (Diamand variety) were simultaneously planted with maize, at a spacing of 0.33 m × 0.055 m in sole crop and intercrop with a density of 360,000 plants·ha<sup>-1</sup>. The pure culture for each variety was used as a control treatment. At the end of the first season (2011-2012), all the plots were mown and the residue was used as mulch: corn only, corn + cowpea and corn + soybeans. At the beginning of the second season (2012), corn was planted on a 5 cm thick mulch [22], without till. So, the experiment was installed in the same plots with a weed mulch plots control.

The parameters observed for this experiment are: maize and legumes yield, number of plants per plot, marketable ears biomass of and unmarketable ears biomass for all maize varieties, edible seed biomass, inedible seed biomass, empty pod biomass for two legume species studied. All of these parameters were observed at the maturity of maize and legume varieties, harvest and post-harvest.

## 2.3. Statistical Analyzes

Data collected were submitted to analysis of variance following the linear model (aov(y~Trait sec\*Trait princ + error (replication/Trait princ)) using agricolae package of R 3.1.3 and least significant difference (LSD) test at 5% probability level was used to compare the treatment means. An economic analysis was carried out to show the profitability of DMC systems.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Intercropping Effect on Number of Plants, Biomass and Maize Yield in First Season

The number of plants varied from 56.21 for the maize sole crop to 38.6 for intercrop with cowpea. The sole crops of Mudishi1, Mudishi 3 and Samaru proved to be more effective with more than 60 plants per plot. This analysis of variance revealed significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments and varieties (Table 2).

As for the marketable biomass, the difference was significant ( $p < 0.05$ ) between treatments, but highly significant among varieties ( $p < 0.001$ ), a peculiarity for Mudishi-3 variety which produced more than 73% of marketable biomass in all treatments. For unmarketable biomass, the difference was not significant between treatments. More losses were observed in sole crop than in intercrop (Table 2).

**Table 2.** Intercropping and sole crop effects on the different maize varieties for number of plants, marketable ears biomass, unmarketable ears biomass and yield in first season.

Varieties	Treatments	Number of plants	Marketable ears biomass (%)	Unmarketable ears biomass (%)	Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )
07SADVE	Sole crop	56.00ab	68.22a	68.72b	2665.86a
08SADVE1	Sole crop	41.75b	68.51a	68.54b	2129.52a
09SADVEF2	Sole crop	54.75ab	67.12ab	69.91b	2128.00a
Mudishi1	Sole crop	61.00.a	70.20a	69.32b	2402.40a
Mudishi3	Sole crop	61.50a	74.77a	76.51a	2283.62a
Samaru	Sole crop	61.50a	72.81a	72.26ab	2849.44a
VP0538	Sole crop	54.50ab	68.68a	73.44ab	2277.22a
ZM523	Sole crop	58.75a	67.88a	72.30ab	2065.53a
<b>Mean</b>	<b>Sole crop</b>	<b>56.21a</b>	<b>69.77b</b>	<b>71.37a</b>	<b>2350.19a</b>
07SADVE	Cowpea	46.25a	70.57a	70.53ab	1999.73a
08SADVE1	Cowpea	33.75b	68.56b	62.47b	1298.92a
09SADVEF2	Cowpea	35.5ab	68.25b	69.3ab	965.13a
Mudishi1	Cowpea	34.75ab	70.63a	70.9ab	753.60ab
Mudishi3	Cowpea	46.25a	73.87a	75.98a	1351.04a
Samaru	Cowpea	46.00a	74.13a	74.52a	2028.88a
VP0538	Cowpea	31.50b	73.31a	71.67ab	1133.73a
ZM523	Cowpea	35.25ab	70.10a	68.84ab	1212.45a
<b>Mean</b>	<b>Cowpea</b>	<b>38.65c</b>	<b>71.17a</b>	<b>70.52a</b>	<b>1342.93c</b>
07SADVE	Soybean	52.50a	69.33ab	69.44a	2206.49a
08SADVE1	Soybean	41.50c	68.20b	63.70a	2040.76a
09SADVEF2	Soybean	45.50b	68.97b	70.00a	1843.63a
Mudishi 1	Soybean	47.00b	70.64ab	72.51a	2113.15a
Mudishi3	Soybean	52.25a	75.05a	75.92a	2291.12a
Samaru	Soybean	47.50b	71.94ab	69.13a	2113.9a
VP0538	Soybean	44.00bc	72.64a	73.63a	1984.68a
ZM523	Soybean	40.00c	70.57ab	72.84a	2062.06a
<b>Mean</b>	<b>Soybean</b>	<b>46.28b</b>	<b>70.91ab</b>	<b>70.89a</b>	<b>2081.97b</b>
Effect of varieties		0.01605*	3.56 <sup>e-11***</sup>	2.194 <sup>e-06***</sup>	0.4757
Effect of treatments		1.996 <sup>e-08***</sup>	0.02226*	0.7206	9.842 <sup>e-05***</sup>
Effect of varieties × treatments		0.8762	0.4624	0.6274	0.9962
CV		18.03	2.76	5.39	32.13
LSD		7.19	1.39	2.93	

Signification statistique: 0 “\*\*\*” 0.001 “\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “†” 0.1 “ns” 1.

About grain yield, a significant difference was observed ( $p < 0.001$ ) between treatments (**Table 1**). Sole crop was greater (2350.2 kg·ha<sup>-1</sup>) than the respective

yield in mixture: 1342.9 kg·ha<sup>-1</sup> for cowpea and 2081.9 kg·ha<sup>-1</sup> for soybeans. Therefore, the highest maize yield was from sole crop of Samaru with 2849.44 kg·ha<sup>-1</sup>. The performance results corroborate those of the number of plants and the biomass of the ears. These results were similar to those obtained by [23] in trials at the SUWAN farm in Thailand, where the yield of maize grown in sole crop was 31.9% higher than maize-soybean. A low density of plants per unit area leads to a decrease in yield [4] [24]. The rate of sowing of each crop in the combination is adjusted below its maximum rate to optimize plant density. If the maximum rate of each crop was used, the yield would not be good due to overpopulation. By reducing the rates of each seedling, the crops have a chance to produce well within intercropping [25]. The challenge is how much can be reduced seeding rates. According to [26] and [27], the spatial arrangement of maize and legumes (intercropping or maize cropping after legume harvesting) does not affect maize yield. A reasonable leaf area index (LAI) is essential to maintain high photosynthesis and yield [28]. Prasad and Brook [29] reported that the increase in corn plant density had a significant effect on LAI in corn-soya intercropping.

### 3.2. Intercropping Effect on Number of Plants, Biomass and Legumes Yield in First Season

Sole crop yield of soybean was higher (1802.23 kg·ha<sup>-1</sup>) than that observed in intercrop with maize (809.31 kg·ha<sup>-1</sup>) in general, with the association 08SADVE1-soya (932.37 kg·ha<sup>-1</sup>) in particular. However, sole crop yield of cowpea produced less (17.82 kg·ha<sup>-1</sup>) than the intercrop with maize (48.39 kg·ha<sup>-1</sup>), although the highest yield was obtained in the intercrop with Samaru (96.14 kg·ha<sup>-1</sup>). Variance analyzes of legume seed yield showed very significant differences ( $p < 0.01$ ) between varieties and interactions, and highly significant differences ( $p < 0.001$ ) between treatments (Table 2). This reduction in soybean and cowpea yields under intercropping could be due to interspecific competition between the intercrop components for water, light, air and nutrients, and also the aggressive effects maize (C<sub>4</sub> species) on soybean and cowpea, a C<sub>3</sub> species [30] [31]. According to Heibsch *et al.* [32], crops with C<sub>4</sub> photosynthetic pathways have been known to be dominant when intercropped with C<sub>3</sub> species like soybean and cowpea. The shading of legumes by the maize plants (taller) may also have contributed to the reduction of the yields of intercropped soybean and cowpea. Olufajo [33] and Matusso [34] reported that shading by the taller plants in mixture could reduce the photosynthetic rate of the lower growing plants and thereby reduce their yields. As for biomass, highly significant differences ( $p < 0.001$ ) were observed between treatment for empty pods and edible seeds (Table 3). The cowpea monoculture yielded 5.5% compared to 4.41% in combination for edible seeds. The soybean monoculture yielded 47.44% edible seed biomass, compared to the association with 46.13%. Analysis of mean numbers of seedlings and inedible biomass showed no differences between treatments, varieties, and interactions (Table 3). The reduction of yield of the legumes components observed in this study was also reported by other researchers [35].

**Table 3.** Effect of the combination of crops on the number of plants per plot and the biomass of legumes in the first season.

Varieties	Treatments	Number of plants	Edible seed biomass (%)	Inedible seed biomass (%)	Empty pod biomass (%)	Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )
<b>Cowpea</b>	<b>Sole crop</b>	<b>632.75</b>	<b>5.50b</b>	<b>11.88</b>	<b>24.69a</b>	<b>17.82b</b>
<b>Soybean</b>	<b>Sole crop</b>	<b>554.25</b>	<b>47.44a</b>	<b>5.03</b>	<b>26.80a</b>	<b>1802.23a</b>
07SADVE	Cowpea	525.75	12.68b	4.75	18.22a	76c
08SADVE1	Cowpea	555.00	3.13c	9.15	30.76a	15.78c
09SADVEF2	Cowpea	583.75	2.09c	6.06	15.85a	39.67c
Mudishi1	Cowpea	541.50	3.09c	7.003	16.51a	38.29c
Mudishi3	Cowpea	577.75	0.84c	7.84	17.54a	19.78c
Samaru	Cowpea	493.75	4.09bc	5.52	17.51a	96.14c
VP0538	Cowpea	489.00	5.49bc	4.64	18.34a	33.28c
ZM523	Cowpea	545.00	3.88c	5.07	16.44a	68.2c
<b>Mean</b>	<b>Cowpea</b>	<b>538.93</b>	<b>4.41bc</b>	<b>6.25</b>	<b>18.89a</b>	<b>48.39c</b>
07SADVE	Soybean	468.5	46.99a	6.62	30.04b	546.92b
08SADVE1	Soybean	535.25	49.37a	5.12	27.41b	932.37a
09SADVEF2	Soybean	557.5	49.02a	4.32	28.8b	885.49a
Mudishi1	Soybean	489.25	45.85a	6.38	27.17b	859.44a
Mudishi3	Soybean	617.75	44.92a	9.11	28.19b	817.77a
Samaru	Soybean	450	41.85a	10.53	28.28b	718.81ab
VP0538	Soybean	497.5	45.62a	5.74	29.64b	838.61a
ZM523	Soybean	579.75	45.48a	6.52	30.34b	875.07a
<b>Mean</b>	<b>Soybean</b>	<b>524.43</b>	<b>46.13a</b>	<b>6.79</b>	<b>28.73b</b>	<b>809.31a</b>
Effect of varieties		0.2541	0.4973	0.8859	0.819	0.0046**
Effect of treatments		0.4217	<2 <sup>e-16***</sup>	0.8342	3.936 <sup>e-05***</sup>	<2.2 <sup>e-16***</sup>
Effect of varieties × treatments		0.9731	0.5685	0.6336	0.521	0.0013**

Signification statistic: 0 “\*\*\*\*” 0.001 “\*\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “†” 0.1 “ns” 1.

Matusso [34] reported that the reduction was mainly due to maize shading effects on soybean, which caused the legume component to allocate its photosynthates to vegetative growth and height increasing for competing with taller maize.

### 3.3. Mulch Effect on Yield, Number of Plants and Maize Biomass in Second Season

Mean for the number of plants varied between 58.12 (maize mulch + cowpea) and 60.09 (maize mulch), and for the biomass of salable spikes varied between 49.30 (maize + Cowpea mulch) and 50.77 (maize mulch). For example, maize yield were higher on maize + cowpea mulch (2974.82 kg·ha<sup>-1</sup>) followed by maize mulch (2686.77 kg·ha<sup>-1</sup>) and maize + soybean mulch (2624.50 kg·ha<sup>-1</sup>). Analysis of the variance of all parameters showed no significant differences ( $p > 0.1$ ) be-

tween varieties, treatments and interactions (**Table 4**). The observations from the present study indicated that crop rotation and residue management practices can affect maize performance significantly. Edmeades [36] reported similar results from multilocal field experiments in Ghana, which showed that in the

**Table 4.** Mulch effects on different maize varieties for number of plant, marketable ears biomass, unmarketable ears biomass and yield in second season.

Varieties	Treatments	Number of Marketable ears plants	Marketable ears biomass (%)	Unmarketable ears biomass (%)	Yield (kg-ha <sup>-1</sup> )
07SADVE	maize mulch	60.75	49.81	47.41	2658.50
08SADVE1	maize mulch	64.75	50.07	55.74	2905.80
09SADVEF2	maize mulch	57.75	57.03	48.23	2586.80
Mudishi1	maize mulch	53.00	50.84	43.17	2467.00
Mudishi3	maize mulch	62.50	47.99	48.11	3474.60
Samaru	maize mulch	59.25	54.67	50.05	2689.00
VP0538	maize mulch	61.25	48.55	61.70	2222.40
ZM523	maize mulch	61.50	47.26	47.44	2490.10
<b>Mean</b>	<b>maize mulch</b>	<b>60.09</b>	<b>50.77</b>	<b>50.23</b>	<b>2686.77</b>
07SADVE	maize + cowpea	63.50	48.90	52.44	3662.80
08SADVE1	maize + cowpea	55.00	47.74	47.87	2494.40
09SADVEF2	maize + cowpea	60.75	43.39	48.35	3034.10
Mudishi1	maize + cowpea	61.50	49.85	50.41	2682.40
Mudishi3	maize + cowpea	56.75	52.32	52.86	2897.80
Samaru	maize + cowpea	55.25	55.63	53.56	3120.20
VP0538	maize + cowpea	56.25	45.68	47.02	2847.30
ZM523	maize + cowpea	56.00	50.93	50.45	3059.60
<b>Mean</b>	<b>maize + cowpea</b>	<b>58.12</b>	<b>49.30</b>	<b>50.37</b>	<b>2974.82</b>
07SADVE	maize + soybean	60	47.54	48.54	2729.20
08SADVE1	maize + soybean	60.5	49.55	47.29	2548.40
09SADVEF2	maize + soybean	67.5	55.46	49.27	3503.40
Mudishi1	maize + soybean	58	53.02	48.45	2604.80
Mudishi3	maize + soybean	56.25	53.79	46.21	2435.30
Samaru	maize + soybean	55.75	49.44	54.22	2503.10
VP0538	maize + soybean	57.25	51.9	42.42	2430.30
ZM523	maize + soybean	54	44.18	49.95	2241.50
<b>Mean</b>	<b>maize + soybean</b>	<b>58.65</b>	<b>50.61</b>	<b>48.29</b>	<b>2624.50</b>
Effect of varieties		0.7018	0.4566	0.9333	0.7053
Effect of treatments		0.6284	0.6554	0.8318	0.2600
Effect of varieties × treatments		0.6519	0.3442	0.3797	0.7952

Signification statistique: 0 “\*\*\*” 0.001 “\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “†” 0.1 “ns” 1.

absence of fertilizer, maize yields following maize sole crop fell significantly, but that this yield drop could be completely compensated by fertilizers or by a cowpea crop. Cowpeas improve maize yield by the nitrogen they fix and by unspecified improvements in soil conditions. Higher yields under maize-legume rotation would have been expected as legumes are known to fix nitrogen, thereby improving the soil nitrogen economy and enhancing the growth of subsequent crops [37]. The differences in maize response to the different rotations could also be attributed to the differences in biomass additions to the soil. Increased residue returned to the soil generally led to increased yields, whereas complete residue removal was very detrimental to maize growth and yield [38].

### 3.4. Variation in Maize Yield in Intercropping and on Mulch

These variations are of the order of 14.32% on maize mulch in sole crop, 121.52% on maize + cowpea mulch and 26.06% on maize + soybean mulch. Maize was seeded on maize + cowpea mulch doubled, tripled or quadrupled its yield compared to those obtained in intercropping during the first season. Analysis of the variance on the mean variation in yield of maize in combination and on mulch revealed highly significant differences between varieties, treatments and interactions ( $p < 0.001$ ) (Table 5). These strong variations would be due to the improvement of the fertility of the soil by the effect of crop rotation. Many studies have reported the highly beneficial effects of seed pulses on soil nitrogen content and cereal grain yields [39] [40]. CIPEA's work in Mali showed that the introduction of cowpea into the rotation resulted in a 60% increase in millet grain yields compared with results obtained in the first year of cultivation [41]. This situation has already been reported by Hardter *et al.* [42], although the maize-cowpea crop had yields lower than in rotation, continuous sole crop have lower productivities. Carsky *et al.* [43] showed higher grain yield of cereal following legume than continuous cropping of cereal in the Nigerian savanna. The increases in the cereal yield were attributed to the biologically fixed N from the legumes. But for such a positive effect to occur, it is expected that the amount of fixed N returned by the legumes to the soil must be greater than the amount of soil N in the harvested grain [44] [45].

According to Bandyopadhyay and De [46], this soil fertility can be explained by residual effects on cereals succeeding legumes in the rotation and by the underground transfers of nutrients in the rhizosphere during intercropping. It appears that the use of the cropping system under cover crop (or mulch) increases the maize yield as demonstrated by Scopel [47]. It turned out that most varieties behaved in the same way in each of the treatments. The Mudishi1 variety increased its yield by more than 250% when it was planted on cowpea and maize mulch (Table 6). Compared to the results presented in intercropping system, the presence of the mulch significantly influenced the grain yield. This situation shows that even at low doses of mulch (5 cm of residue thickness), a considerable effect can be observed on the behavior of the plants. These results are similar to those reported by Van Asten *et al.* [22]. These results could be explained that



sowing under cover crop (or mulch) improves the fertility of the cultivated soils and, in particular, Productivity of the cultivated areas. Mckenney *et al.* [48], Mary *et al.* [49], Abiven [50], Schroth *et al.* [51] showed increased nitrogen availability due to degradation and mineralization of legume mulch compared to bare soil.

**Table 5.** Intercrops and mulches effects on performance in the first and second seasons.

Varieties	Treatments	Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )		
		Season 1	Season 2	Accroissement (%)
07SADVE	Sole crop	2665.86a	2658.50	-0.28d
08SADVE1	Sole crop	2129.52a	2905.80	36.45b
09SADVEF2	Sole crop	2128.00a	2586.80	21.56b
Mudishi1	Sole crop	2402.40a	2467.00	2.69c
Mudishi3	Sole crop	2283.62a	3474.60	52.15a
Samaru	Sole crop	2849.44a	2689.00	-5.63d
VP0538	Sole crop	2277.22a	2222.40	-2.41d
ZM523	Sole crop	2065.53a	2490.10	20.56b
<b>Mean</b>	<b>Sole crop</b>	<b>2350.19a</b>	<b>2686.77</b>	<b>14.32c</b>
07SADVE	Cowpea	1999.73a	3662.80	83.16c
08SADVE1	Cowpea	1298.92a	2494.40	92.04c
09SADVEF2	Cowpea	965.13a	3034.10	214.37a
Mudishi1	Cowpea	753.60ab	2682.40	255.94a
Mudishi3	Cowpea	1351.04a	2897.80	114.49b
Samaru	Cowpea	2028.88a	3120.20	53.79d
VP0538	Cowpea	1133.73a	2847.30	151.14b
ZM523	Cowpea	1212.45a	3059.60	152.35b
<b>Mean</b>	<b>Cowpea</b>	<b>1342.93c</b>	<b>2974.82</b>	<b>121.52a</b>
07SADVE	Soybean	2206.49a	2729.20	23.69b
08SADVE1	Soybean	2040.76a	2548.40	24.88b
09SADVEF2	Soybean	1843.63a	3503.40	90.03a
Mudishi1	Soybean	2113.15a	2604.80	23.27b
Mudishi3	Soybean	2291.12a	2435.30	6.29d
Samaru	Soybean	2113.90a	2503.10	18.41c
VP0538	Soybean	1984.68a	2430.30	22.45b
ZM523	Soybean	2062.06a	2241.50	8.70d
<b>Mean</b>	<b>Soybean</b>	<b>2081.97b</b>	<b>2624.50</b>	<b>26.06b</b>
Effect of varieties		0.4757	0.7053	0.4937
Effect of treatments		9.842 <sup>c-05***</sup>	0.2600	1.55 <sup>c-06***</sup>
Effect of varieties × treatments		0.9962	0.7952	0.7580

Signification statistique: 0 “\*\*\*” 0.001 “\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “†” 0.1 “ns” 1.

**Table 6.** Economic analysis of maize varieties in combination with legumes.

Varieties	Treatments	Gross return (\$)	Net return (\$)	Cost/return ratio (%)
07SADVE	Cowpea	3459.53ab	2223.66ab	2.80
08SADVE1	Cowpea	2191.17bc	955.30bc	1.77
09SADVEF2	Cowpea	1674.65bc	438.79bc	1.36
Mudishi1	Cowpea	1319.82c	83.96c	1.07
Mudishi3	Cowpea	2284.71bc	1048.84bc	1.85
Samaru	Cowpea	3541.70bc	2305.83ab	2.87
VPO538	Cowpea	1945.02bc	709.15bc	1.57
ZM523	Cowpea	2134.42bc	898.55bc	1.73
<b>Mean</b>	<b>Cowpea</b>	<b>2330.48ab</b>	<b>1088.43ab</b>	<b>1.88</b>
07SADVE	Soybean	4589.01a	3307.14a	3.58
08SADVE1	Soybean	4955.21a	3673.34a	3.87
09SADVEF2	Soybean	4548.52a	3266.65a	3.55
Mudishi1	Soybean	4954.32a	3672.45a	3.86
Mudishi3	Soybean	5181.48a	3899.61a	4.04
Samaru	Soybean	4721.18a	3439.31a	3.68
VPO538	Soybean	4705.47a	3423.60a	3.67
ZM523	Soybean	4895.21a	3613.35a	3.82
<b>Mean</b>	<b>Soybean</b>	<b>4842.89a</b>	<b>3554.62a</b>	<b>3.76</b>
07SADVE	Sole crop	1333.15c	120.48c	1.10
08SADVE1	Sole crop	865.94c	-346.72c	0.71
09SADVEF2	Sole crop	643.41c	-569.25c	0.53
Mudishi1	Sole crop	502.40c	-710.27c	0.41
Mudishi3	Sole crop	900.69c	-311.97c	0.74
Samaru	Sole crop	1352.58c	139.92c	1.12
VPO538	Sole crop	755.81c	-456.85c	0.62
ZM523	Sole crop	808.30c	-404.37c	0.67
<b>Mean</b>	<b>Sole crop</b>	<b>899.77b</b>	<b>-2551.71b</b>	<b>0.74</b>
Effect of varieties		0.6241	0.6241	0.5963
Effect of treatments		<2 <sup>e-16***</sup>	<2 <sup>e-16***</sup>	4.834 <sup>e-16</sup>
Effect of varieties × treatments		0.9695	0.9695	0.9665

Signification statistic: 0 “\*\*\*\*” 0.001 “\*\*\*” 0.01 “\*\*” 0.05 “\*” 0.1 “†” 0.5 “ns” 1. Average procurement price per kg of maize = \$0.67; cowpea = \$1; soybean = \$1.

An organic matter and minerals enrichment through residual recycling was studied by Owens and Edwards [52] and Uzoh *et al.* [53] on maize-soybean-cowpea rotation, highlighting the recycling of carbon and nitrogen through the production of Vegetable biomass of legume.

### 3.5. Economic Analysis of Maize Varieties in a Combination and Rotation System on Legume Mulch

The economic analysis of different crops indicated gains for maize-cowpea (\$1088.43) and maize-soybean (\$3554.62) intercrops, losses for maize sole crops except for 07SADVE and Samaru varieties for which we observed gains in order of \$121.09 and \$140.62 respectively. On the different intercropping systems, the maximum net return were \$USD 3919.12 (Mudishi 3-soya) and minimum were \$712.70 (VPO538-cowpea). The greatest cost/benefit ratio of the Mudishi 3-soybean intercrop (4.04) indicates the low investment cost in operating expenses, while highest deficit observed in Mudishi 1 variety sole crop (\$713.82) showing the high investment cost in operating expenses. Analysis of the variance of gross return, benefit, and benefit/cost ratio in intercropping economic analysis revealed highly significant differences ( $p < 0.001$ ) between treatments (Table 6).

Maize varieties with soybeans in intercropping system produced higher values gross return and net return than maize-cowpea associations and the different sole crop, probably due to yields obtained in each crops. The large benefit produced in the maize/soybean intercrop compared to other systems could probably be the result of the high yield and price of legumes compared to maize [27]. Similar observations were made by Egbe [54] in pigeon pea-sorghum and pigeon pea-maize, and Banik (1996) in wheat-gram, wheat-pea and wheat-lentil intercrops. Njoroge *et al.* [55] estimated the net profit of coffee associated with food products by subtracting all variable costs from gross profits. Similarly, Egbe [54] had estimated the total profit and the marginal benefit/cost ratio from investment on different farm inputs used in pigeon pea/sorghum intercropping system by computing returns per naira invested. In an innovative, improved intercropping system, named MBILI (kiswahili for “two”, and an acronym for “Managing Beneficial Interactions in Legume Intercrops”), also known as a two-by-two staggered arrangement [56], the MBILI system resulted in robust increases in crop yields and net benefits, in comparison with the conventional intercropping system. The MBILI system did not entail larger labour costs and Woomeer [57] showed that the MBILI system was profitable across a wide range of smallholders’ croplands in western Kenya, and that, when combined with a fertilizer application at a modest rate; the benefit-cost ratio was higher relative to other recommended technologies in the area.

In contrast, analysis of the variance of gross return, benefit, and benefit/cost ratio in mulch crops system revealed no significant differences ( $p > 0.1$ ) between varieties, treatments and interactions (Table 7). On the different mulch cropping systems, maximum net return were \$USD 1234.03 (07SADVE-cowpea) with a cost/benefit ratio of 2.01 and the minimum benefits were \$USD 268.95 (VPO538 sole crop).

Residue production by preceding crop is an important factor in defining the magnitude of rotation benefit conferred to subsequent crop [58]. This is because

**Table 7.** Economic analysis of corn varieties on legume mulch.

Varieties	Treatments	Gross return (\$)	Net return (\$)	Cost/return ratio (%)
07SADVE	maize + cowpea	2441.89	1227.89	2.01
08SADVE1	maize + cowpea	1662.90	448.90	1.37
09SADVEF2	maize + cowpea	2022.71	808.71	1.67
Mudishi1	maize + cowpea	1788.24	574.24	1.47
Mudishi3	maize + cowpea	1931.88	717.88	1.59
Samaru	maize + cowpea	2080.11	866.11	1.71
VPO538	maize + cowpea	1898.23	684.23	1.56
ZM523	maize + cowpea	2039.74	825.74	1.68
<b>Mean</b>	<b>maize + cowpea</b>	<b>1993.13</b>	<b>773.06</b>	<b>1.63</b>
07SADVE	maize + soybean	1819.48	605.48	1.5
08SADVE1	maize + soybean	1698.90	484.90	1.4
09SADVEF2	maize + soybean	2335.61	1121.61	1.92
Mudishi1	maize + soybean	1736.53	522.53	1.43
Mudishi3	maize + soybean	1623.53	409.53	1.34
Samaru	maize + soybean	1668.74	454.74	1.37
VPO538	maize + soybean	1620.21	406.21	1.33
ZM523	maize + soybean	1494.33	280.33	1.23
<b>Mean</b>	<b>maize + soybean</b>	<b>1758.41</b>	<b>538.34</b>	<b>1.44</b>
07SADVE	maize mulch	1772.34	558.34	1.46
08SADVE1	maize mulch	1937.19	723.19	1.6
09SADVEF2	maize mulch	1724.51	510.51	1.42
Mudishi1	maize mulch	1644.65	430.65	1.35
Mudishi3	maize mulch	2316.42	1102.42	1.91
Samaru	maize mulch	1792.64	578.64	1.48
VPO538	maize mulch	1481.61	267.61	1.22
ZM523	maize mulch	1660.05	446.05	1.37
<b>Mean</b>	<b>maize mulch</b>	<b>1800.13</b>	<b>580.06</b>	<b>1.48</b>
Effect of varieties		0.7053	0.7053	0.7053
Effect of treatments		0.2600	0.2600	0.2600
Effect of varieties × treatments		0.7952	0.7952	0.7952

Signification statistique: 0 “\*\*\*” 0.001 “\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “†” 0.1 “ns” 1. Average procurement price per kg of maize = \$0.67; cowpea = \$1; soybean = \$1.

Legume crop residues contain organic N and other nutrients, which are released after decomposition by soil microbes for the subsequent crop through mineralization [59]. And the quality of residue is very important in determining mineralization and nutrient release and then yield. Some of the residue parameters include C/N ratio, nutrient content etc. Uzoh *et al.* [53] reported that maize residues contained more carbon and less nitrogen than legumes residues and mineraliza-

tion and release of nutrients were higher in plots amended with legumes residue as velvet-bean.

#### 4. Conclusion

This study was to acquire knowledge on the profitability and response of maize crop in intercrop and rotation with legumes based on DMC to determine the optimum combination of yield grain and total grain biomass. The residual effects of cowpea crops have been shown to have considerably increased maize yield. As for the production of pulses in combination with maize, soybeans were more efficient than cowpeas. All maize varieties each presented a combination that maximized productivity. The varieties 09SADVE F2, Mudishi1, Mudishi3, VPO538 and Zm523 have doubled, tripled or quadrupled their yields when rotated with cowpea. Maize sole crop, which produces poor mulch, resulted in low yields in the second season, resulting in losses of more than 5%. The high yields observed in this study resulted in significant benefits in increasing their ratios whether in combination or in rotation.

#### Acknowledgements

We would like to thank the staff of The National Institute of Study and Research Agronomy (INERA) and The International Institute of Tropical Agriculture (IITA) for this financial support.

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflicts of interest regarding the publication of this paper.

#### References

- [1] Hamd Alla, W.A., Shalaby, E.M., Dawood, R.A. and Zohry, A.A. (2014) Effect of Cowpea (*Vigna sinensis* L.) with Maize (*Zea mays* L.) Intercropping on Yield and Its Components. *International Journal of Biological, Veterinary, Agricultural and Food Engineering*, **8**, 1170-1176.
- [2] Hauggaard-Nielsen, H., Andersen, M.K., Jørnsgaard, B. and Jensen, E.S. (2006) Density and Relative Frequency Effects on Competitive Interactions and Resource Use in Pea-Barley Intercrops. *Field Crops Research*, **95**, 256-267. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.03.003>
- [3] Ofori, F. and Stern, W.R. (1987) Cereal-Legume Intercropping Systems. *Advances in Agronomy*, **41**, 41-90. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60802-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60802-0)
- [4] Mandal, M.K., Banerjee, M., Banerjee, H., Pathak, A. and Das, R. (2014) Evaluation of Cereal-Legumes Intercropping Systems through Productivity and Competition Ability. *Asian Journal of Science and Technology*, **5**, 233-237.
- [5] Steiner, K.G. (1982) Intercropping in Tropical Smallholder Agriculture with Special Reference to West Africa. *Schriftenreihe der GT2*, N. 137, Eischbon, 303 p.
- [6] Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. and Jensen, E.S. (2001) Evaluating Pea and Barley Cultivars for Complementary in Intercropping at Different Levels of Soil N Availability. *Field Crops Research*, **72**, 185-196. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00176-9)

- [7] Sanginga, N. and Woomer, P.I. (2009) Integrated Soil Fertility Management in Africa: Principles, Practices, and Developmental Processes. TSBF-CIAT, Nairobi, 263 p.
- [8] Trenbath, B.R. (1976) Plant Interactions in Mixed Crop Communities. In: Papendick, R.I., Sanchez, P.A. and Triplett, G.B., Eds., *Multiple Cropping*, American Society of Agronomy Special Publication, 129-170.  
<https://doi.org/10.2134/asaspecpub27.c8>
- [9] Willey, R.W., Natarajan, M., Reddy, M.S., Rao, M.R., Nambiar, P.T.C.M., Kannaiyan, J. and Bhatnagar, V.S. (1983) Intercropping Studies with Annual Crops. In: Nugent, J. and O'Connor, M., Eds., *Better Crop for Food*, Pitman Co., London, 83-100.
- [10] Roose, E. (1984) Impact du défrichement sur la dégradation des sols tropicaux. *Machine Agricole Tropicale*, **87**, 24-36.
- [11] Beirnaert, G. (1941) La technique culturale sous l'Equateur. Publ. INEAC Ser. Techn., 86 p.
- [12] Jurion, F. and Henry, J. (1967) De l'agriculture itinérante l'agriculture intensifiée. INEAC, Bruxelles, 498 p.
- [13] Ilnicki, R.D. and Enache, A.J. (1992) Subterranean Clover Living Mulch: An Alternative Method of Weed Control. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **40**, 249-264. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90096-T](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90096-T)
- [14] Machet, J.M., Laurent, F., Chapot, J.Y., Dore, T. and Dutroux, A. (1997) Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. In INRA Ed., *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*, Les Colloques No. 83, 271-288.
- [15] Capillon, A. and Seguy, L. (2002) Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. Cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, **88**, 63-70.
- [16] CIALCA (2008) Rapport d'avancement 4-Bujumbura, Amélioration des moyens de vie basés sur l'agriculture en Afrique Centrale par le biais d'une productivité de systèmes durablement accrue en vue d'améliorer les revenus, la sécurité alimentaire et l'environnement. Réunion de lancement de CIALCA-II, Bujumbura, du 28 au 31 octobre 2008, 28 p.
- [17] Mucheru-Muna, M., Pypers, P., Mugendi, D., Kung'u, J., Mugwe, J., Merckx, R. and Vanlauwe, B. (2010) A Staggered Maize-Legume Intercrop Arrangement Robustly Increases Crop Yields and Economic Returns in the Highlands of Central Kenya. *Field Crops Research*, **115**, 132-139. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.10.013>
- [18] Gilley, J.E., Finkner, S.C. and Varvel, G.E. (1987) Slope Length and Surface Residue Influences on Runoff and Erosion. *Transactions—American Society of Agricultural Engineers*, **30**, 148. <https://doi.org/10.13031/2013.30417>
- [19] Alberts, E. and Neibling, W.H. (1994) Influence of Crop Residues on Water Erosion. In: Unger, P.W., Ed., *Managing Agricultural Residues*, Lewis Pub., 20-39.
- [20] Köppen, W. (1936) Das geographische system der climate. In: Köppen, W. and Geiger, R., Eds., *Handbuch der klimatologie*, Grebrüder Borntraeger, Berlin, 1-44.
- [21] Paliwal, L.R., Granados, G., Violic, A.D., Lafitte, H.R. and Marathe, J.P. (2002) Le maïs en zones tropicales: Amélioration et production. 256 p.
- [22] Van Asten, P.J.A., Twagirayezu, P. and Gaidashova, S. (2007) Effect of Guatamala Grass (*Tripsacum laxum*) Mulch Applications on Soil Moisture Conservation and Soil Fertility Status. *Proceedings of ISAR National Conference*, Kigali, 26-27.
- [23] Kasetsart University (1989) Annual Report. Department of Agronomy and National Corn and Sorghum Research Center, Bangkok.

- [24] Jeyakumaran, J. and Seran, T.H. (2007) Studies on Intercropping Capsicum (*Cap-sicum annum* L.) with Bushitao (*Vigna unguiculata* L.). *Proceedings of the 6th Annual Research Session*, 18-19 October 2007, 431-440.
- [25] Seran, T.H. and Brintha, I. (2010) Review on Maize Based Intercropping. *Journal of Agronomy*, **9**, 135-145. <https://doi.org/10.3923/ja.2010.135.145>
- [26] Adafre, A.N. (2016) Advantages of Maize-Haricot Bean Intercropping over Sole Cropping through Competition Indices at West Badewacho Woreda, Hadiya Zone, SNNPR. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research*, **4**, 1-8.
- [27] Khonde, P., Tshiabukole, K., Kankolongo, M., Hauser, S., Djamba, M., Vumilia, K. and Nkongolo, K. (2018) Evaluation of Yield and Competition Indices for Inter-cropped Eight Maize Varieties, Soybean and Cowpea in the Zone of Savanna of South-West RD Congo. *Open Access Library Journal*, **5**, e3746. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103746>
- [28] Xiaolei, S. and Zhifeng, W. (2002) The Optimal Leaf Area Index for Cucumber Photosynthesis and Production in Plastic Green House. ISHS Acta Horticulturae, 633 (XXVI International Horticultural Congress). [http://www.actahort.org/books/633/633\\_19.htm](http://www.actahort.org/books/633/633_19.htm)
- [29] Prasad, R.B. and Brooks, R.M. (2005) Effects of Varying Maize Density on Inter-cropped Maize and Soybeans in Nepal. *Experimental Agriculture*, **41**, 365-382. <https://doi.org/10.1017/S0014479705002693>
- [30] Egbe, O.M., Alibo, S.E. and Nwueze, I. (2010) Evaluation of Some Extra-Early- and Early-Maturing Cowpea Varieties for Intercropping with Maize in Southern Guinea Savanna of Nigeria. *Agriculture and Biology Journal of North America*, **1**, 845-858. <https://doi.org/10.5251/abjna.2010.1.5.845.858>
- [31] Muoneke, C.O., Ogwuche, M.A.O. and Kalu, B.A. (2007) Effect of Maize Planting Density on the Performance of Maize/Soybean Intercropping System in a Guinea Savannah Agro-Ecosystem. *African Journal of Agricultural Research*, **2**, 667-677.
- [32] Hiebsch, C., Tetio-Kegho, F. and Chirembo, F.P. (1995) Plant Density and Soybean Maturity in a Soybean-Maize Intercrop. *Agronomy Journal*, **87**, 965-970. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700050032x>
- [33] Olufajo, O.O., Ogungbile, A.O. and Ahmed, B. (1997) On-Farm Testing of Variety and NPK Fertilization for Maize-Cowpea Mixture in the Nigeria Savanna. In: Sed-go, T. and Oueuedraogo, M., Eds., *Technology Options for Sustainable Agriculture in Sub-Saharan Africa*, Publication of the Semi-Arid Food Grain Research and Development Agency (SAFGRAD) of the Scientific, Technical and Research Commission of OAU, Oueuedraogo, 235-246.
- [34] Matusso, J.M.M. (2014) Effects of Maize (*Zea mays* L.)-Soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) Intercropping Patterns on Yields and Soil Properties in Two Contrasting Sites of Embu and Meru Counties, Kenya. Thesis, School of Agriculture and Enterprise Development, Kenyatta University, Nairobi. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7178>
- [35] Alhassan, G.A., Kalu, B.A. and Egbe, O.M. (2012) Influence of Planting Densities on the Performance of Intercropped Bamabra Groundnut with Cowpea in Makurdi, Benue State, Nigeria. *International Journal of Development and Sustainability*, **1**, 1-20.
- [36] Edmeades, G.O. (1990) Significant Accomplishments of Ghana Grains Development Project during Phase I, 1979-1983. *10th Ann. Maize and Coxpea Workshop of the Ghana Grains Dev. Proj.*, Kumasi, 20-23.
- [37] Cheruiyot, E.K., Mumera, L.M., Nakhone, L.N. and Mwonga, S.M. (2003) Effect of

- Legume-Managed Fallow on Weeds and Soil Nitrogen in Following Maize (*Zea mays* L.) and Wheat (*Triticum aestivum* L.) Crops in the Rift Valley Highlands of Kenya. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **43**, 597-604. <https://doi.org/10.1071/EA02033>
- [38] Adiku, S.G.K., Jones, J.W., Kumaga, F.K. and Tonyigah, A. (2009) Effects of Crop Rotation and Fallow Residue Management on Maize Growth, Yield and Soil Carbon in a Savannah-Forest Transition Zone of Ghana. *Journal of Agriculture Science*, **147**, 313-322. <https://doi.org/10.1017/S002185960900851X>
- [39] De, R., Rao, Y.Y. and Ali, W. (1983) Grain and Fodder Legumes as Preceding Crops Affecting the Yield and N Economy in Rice. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, **101**, 463-466. <https://doi.org/10.1017/S0021859600037825>
- [40] Kumar Rao, J.V.D.K., Dart, P.J. and Sastry, P.V.S.S. (1983) Residual Effect of Pigeon Pea (*Cajanus cajan*) on Yield and Nitrogen Response of Maize. *Experimental Agriculture*, **19**, 137-141. <https://doi.org/10.1017/S0014479700022572>
- [41] CIPEA (1984) Rapport Annuel du CIPEA 1983. Addis-Abeba (Ethiopie).
- [42] Hardter, R., Horst, W.J., Schmidt, G. and Frey, E. (1991) Yields and Land Use Efficiency of Maize-Cowpea Crop Rotations in Comparison to Mixed and Monocropping on an Alfisol in Northern Ghana. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **166**, 326-337. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1991.tb00922.x>
- [43] Carsky, R.J., Abaidoo, R., Dashiell, K.E. and Sanginga, N. (1997) Effect of Soybean on Subsequent Maize Grain Yield in Guinea Savanna of West Africa. *African Crop Science Journal*, **5**, 31-39. <https://doi.org/10.4314/acsj.v5i1.27868>
- [44] Giller, K.E. and Wilson, K.J. (1991) Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CAB International, Wallingford, 167-237.
- [45] Yusuf, A.A., Iwuafor, E.N.O., Abaidoo, R.C., Olufajo, O.O. and Sanginga, N. (2009) Grain Legume Rotation Benefits to Maize in the Northern Guinea Savanna of Nigeria: Fixed-Nitrogen versus Other Rotation Effects. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, **84**, 129-139. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9232-9>
- [46] Bandyopandhyay, S.K. and De, R. (1986) N Relationship in a Legume-Non Legume Association Grown in an Intercropping System. *Fertilizer Research*, **10**, 73-82. <https://doi.org/10.1007/BF01073906>
- [47] Scopel, E. (1994) Le semis direct avec paillis de résidus dans la région de V. Carranza au Mexique: Intérêt de cette technique pour améliorer l'alimentation hydrique du maïs pluvial en zones à pluviométrie irrégulière. PhD, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 334 p.
- [48] McKenney, D.J., Wang, S.W., Drury, C.F. and Findlay, W.I. (1993) Denitrification and Mineralization in Soil Amended with Legumes, Grass and Corn Residues. *Soil Science Society of American Journal*, **57**, 1013-1020. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700040022x>
- [49] Mary, B., Recous, S., Darwis, D. and Robin, D. (1996) Interactions between Decomposition of Plant Residues and Nitrogen Cycling in Soil. *Plant and Soil*, **181**, 71-82. <https://doi.org/10.1007/BF00011294>
- [50] Abiven, S. (2001) Effet de la qualité et de la localisation initial dans le sol sur la décomposition de résidus de culture. DEA Paris, INAA P-G, Paris VI: 41 p.
- [51] Schroth, G., Salazar, E. and Da Silva, Jr. J.P. (2001) Soil Nitrogen Mineralization under Tree Crops and Legume Cover Crop in Multi-Strata Agroforestry in Central Amazonia: Spatial and Temporal Patterns. *Experimental Agriculture*, **37**, 253-267. <https://doi.org/10.1017/S0014479701002058>



- [52] Owens, L.B. and Edwards, W.M. (1993) Tillage Studies with a Corn-Soybean Rotation: Surface Runoff Chemistry. *Soil Science Society of American Journal*, **57**, 1055-1060. <https://doi.org/10.2136/sssaj1993.03615995005700040029x>
- [53] Uzoh, I.M., Igwe, C.A., Okebalama, C.B. and Balalola, O.O. (2019) Legume-Maize Rotation Effect on Maize Productivity and Soil Fertility Parameters under Selected Agronomic Practices in a Sandy Loam Soil. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 8539. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43679-5>
- [54] Egbe, O.M. (2005) Evaluation of Some Agronomic Potential of Pigeonpea Genotypes for Intercropping with Maize and Sorghum in Southern Guinea Savanna. PhD Thesis, University of Agriculture, Makurdi.
- [55] Njoroge, J.M., Waithaka, K. and Chweya, J.A. (1993) Effects of Intercropping Young Plants of the Compact Arabica Coffee Hybrid Cultivar Ruiru 11 with Potatoes, Tomatoes, Beans and Maize on Coffee Yields and Economic Returns in Kenya. *Experimental Agriculture*, **29**, 373-377. <https://doi.org/10.1017/S0014479700020937>
- [56] Tungani, J.O., Mukhwana, E. and Woomer, P.L. (2002) MBILI Is Number 1: A Handbook for Innovative Maize-Legume Intercropping. SACRED Africa, Bungoma.
- [57] Woomer, P.L. (2007) Costs and Returns of Soil Fertility Management Options in Western Kenya. In: Bationo, A., Waswa, B., Kihara, J. and Kimetu, J., Eds., *Advances in Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Challenges and Opportunities*, Springer, Berlin, 881-890. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5760-1\\_84](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5760-1_84)
- [58] Seymour, M., Kirkegaard, J.A., Peoples, M.B., White, P.F. and French, R.J. (2012) Break-Crop Benefits to Wheat in Western Australia—Insights from over Three Decades of Research. *Crop and Pasture Science*, **63**, 1-16. <https://doi.org/10.1071/CP11320>
- [59] Chu, G., Shen, Q. and Cao, J. (2004) Nitrogen Fixation and N Transfer from Peanut to Rice Cultivated in Aerobic Soil in an Intercropping System and Its Effect on Soil N Fertility. *Plant and Soil*, **263**, 17-27. <https://doi.org/10.1023/B:PLSO.0000047722.49160.9e>



# Evaluation of Yield and Competition Indices for Intercropped Eight Maize Varieties, Soybean and Cowpea in the Zone of Savanna of South-West RD Congo

Pongi Khonde<sup>1\*</sup>, Kabongo Tshiabukole<sup>1</sup>, Mbuya Kankolongo<sup>1</sup>, Stefan Hauser<sup>2</sup>, Mumba Djamba<sup>3</sup>, Kizungu Vumilia<sup>4</sup>, Kabwe Nkongolo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Programme National Maïs, INERA, Kinshasa, RD Congo

<sup>2</sup>The International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria

<sup>3</sup>Université Pédagogique Nationale, Kinshasa, RD Congo

<sup>4</sup>Direction Scientifique, Biométrie et Expérimentation, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

<sup>5</sup>Département des Sciences Biologiques, Université Laurentienne, Sudbury, Canada

Email: \*jpkabon2005@gmail.com, \*getousfr2002@gmail.com

**How to cite this paper:** Khonde, P., Tshiabukole, K., Kankolongo, M., Hauser, S., Djamba, M., Vumilia, K. and Nkongolo, K. (2018) Evaluation of Yield and Competition Indices for Intercropped Eight Maize Varieties, Soybean and Cowpea in the Zone of Savanna of South-West RD Congo. *Open Access Library Journal*, 5: e3746. <https://doi.org/10.4236/oalib.1103746>

**Received:** June 17, 2017

**Accepted:** January 2, 2018

**Published:** January 5, 2018

Copyright © 2018 by authors and Open Access Library Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

In order to enhance the legumes potential advantages on the cereal yield in intercropping system by nitrogen direct transfer from legume to cereal, an intercropping experiment was conducted between eight maize varieties (07SADVE, 08SADVE 1, 09SADVE F2, Mudishi 1, Mudishi 3, VP0523, ZM538 and Samaru), cowpea (*Vigna unguiculata* var. H4) and soybean (*Glycine max* var. Vuangi) during November 2011-February 2012 season at INERA/Mvuazi in the south-western country of DR Congo. The experimental design was a Split plot with four replications, twenty six treatments were applied between maize varieties monocrops (40.000 plant·ha<sup>-1</sup>) and legumes in monoculture (360.000 plant·ha<sup>-1</sup>) and both of sole planting were combined. Evaluation of these soles planting was performed on basis of several intercropping indices (MYE, LER, ATER, RCC, A and CR), the monetary advantage index (MAI), Actual Yield Loss index (AYL) and intercropping index (IA). After data analysis, competitiveness indices indicated the higher yields advantages of maize varieties in intercropping, especially Mudishi 3-soybean (MYE = 2836.300 kg·ha<sup>-1</sup>). The equivalent land ratio (LER) varied with 08SADVE 1 variety between 0.70 and 1.66 in cowpea and soybean intercrops respectively, the Relative crowding coefficient (RCC) showed yield advantage of all intercrops except with 09SADVE F2, Mudishi 1 and 07SADVE. Aggressivity (A) showed dominance of maize in all intercrops, against the Competitive ratio (CR) showed that the

competitiveness was stronger on cowpea (from 16.42 to 98.63) than soybean (from 16.12 to 25.70). Actual yield loss (AYL) was negative in all intercrops with cowpea and soybean. Thus, the index of association (IA) informed that the negative values of the different intercrops were due to the maize price (1000 CDF·kg<sup>-1</sup>) and legumes price (1500 CDF·kg<sup>-1</sup>). Finally, the monetary advantage index (MAI = 922.92) and PCA had determined that intercrop with Mudishi 3-soybean as an economic efficiency intercrop than others mixtures.

## Subject Areas

Agricultural Science

## Keywords

Intercropping, Maize, Legumes, LER, Monetary Advantage Index, DR Congo

---

## 1. Introduction

Intercropping has gained interest because of potential advantages it offers over yielding, *i.e.* improved utilization of growth resources by the crops and improved reliability from season to season. When a legume is grown in association with another crop (intercropping), commonly a cereal, nitrogen nutrition of the associated crop may be improved by direct nitrogen transfer from the legume to cereal [1]. Thus, several systems have been proposed to solve the problems of soil depletion [2] [3], among others the direct seeding mulch-based cropping systems (DMC) [4].

Studies carried out throughout the world have shown that the direct seeding mulch-based cropping system ensures a good productivity of the cultivated surfaces and gives many advantages in the soil management [5] [6] [7] [8] [9].

Intercropping of cereals with legumes has been popular in tropics [10] [11] and rain-fed areas of the world [12] [13] [14] [15] due to its advantages for soil conservation [16], weed control [17] [18], lodging resistance, yield increase [16] [19], and legume root parasite infections control [20].

Different seeding ratios or planting patterns for cereal-legume intercropping have been practiced by many researchers [15] [18] [21]. Competition among mixtures is thought to be the major aspect affecting yield as compared with solitary cropping of cereals [22].

Various measures of the efficiency of intercropping systems relative to sole cropping were employed [23]. A number of indices such as land equivalent ratio, area time equivalent ratio, relative crowding coefficient, competitive ratio, aggressivity, actual yield loss, monetary advantage, and intercropping advantage have been proposed to describe competition within and economic advantages of intercropping systems [12] [13] [24] [25] [26]. Mathematical indices, formed by combining several primary measures, can help researchers summarize, interpret

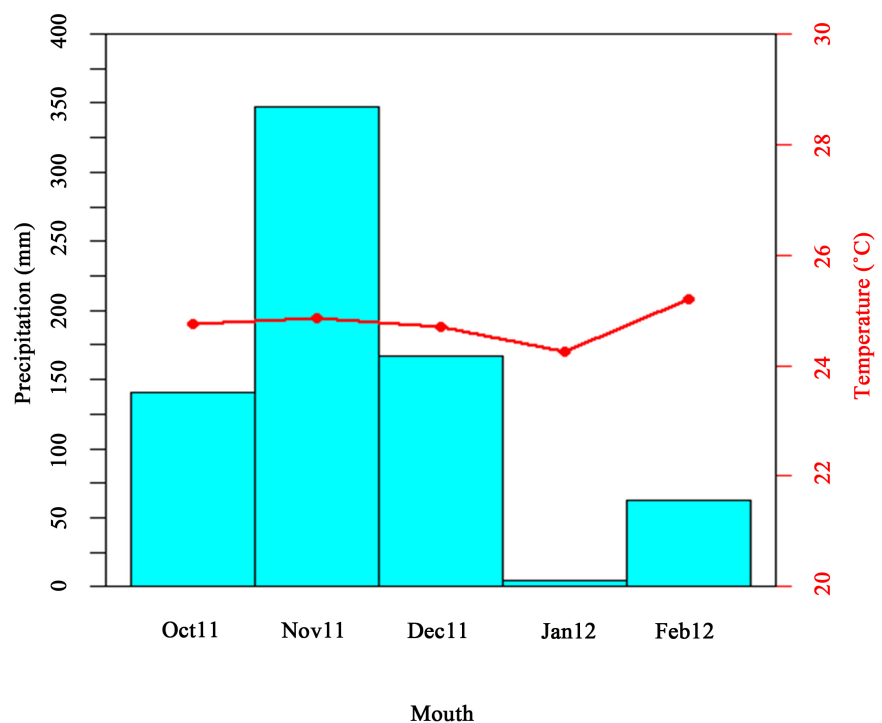
and display results from plant competition experiments [27]. However, the land equivalent ratio (LER) is the most-used convention for intercrop versus sole crop comparisons. Comparisons in competitive ability of the intercrop components were often made by calculating crowding coefficients and aggressivity values as in [28].

In this study we used a seedling model to determine whether the gaps considered for corn and DMC legumes can yield better yields relative to the yields of each monoculture crop and examine the ratios Competitiveness indices of maize and legumes in association cropping systems.

## 2. Material and Method

### 2.1. Crop Management and Experimental Design

The experiment was conducted at the INERA/Mvuazi Center, located in Kongo-Central province, 207 km south-west of Kinshasa ( $5^{\circ}27'08.77''S$  et  $14^{\circ}53'20.34''E$  at 427 m altitude) during 2011-2012 growing season. The climatic and edaphic characteristics of INERA/Mvuazi correspond to those of the tropical zone with warm and humid climate of type  $AW_4$  according to the classification of Köppen with 6 months of rainy season intercalated by a short drought (2 months), and followed of 4 months of dry season. Temperature variation and precipitation amount during the study period was presented in **Figure 1**. The soil of Mvuazi valley develops a humiferous horizon 15 - 25 cm thick, black (fresh) or brownish (dry) with a well-pronounced subangular or grumulous structure. This horizon is often overhauled by crops.



**Figure 1.** Temperature variation and precipitation amount during the study period.

The experiment was in factorial design with 4 replications and treatments consisted to intercropping and sole cropping. Eight maize varieties, which five came from Zimbabwe (07 SADVE, 08 SADVE1, 09 SADVE-F2, ZM523, VP0538) and three local check of DR Congo (Mudishi1, Mudishi3 and Samaru) were sown at a spacing of 1 m × 0.25 m in sole crop and intercrop with a density of 80,000 plants·ha<sup>-1</sup>, according to Paliwal *et al.* [29], in plots of 6 m × 4 m. Soybean (variety Vuangi) and cowpea (variety Diamand) were simultaneously planted with maize, at a spacing of 0.33 m × 0.055 m in pure culture and sole crop and intercrop with a density of 360,000 plants·ha<sup>-1</sup>. The pure culture for each variety was used as a control treatment.

## 2.2. Competitions Indices and Monetary Advantages

The competition effects between 3 species used in this experiment were calculated by using the indices of competition. Seeds of each species were weighed and adjusted on the constant levels of moisture, and maize was the principal crop and the legumes like components of intercrops. The maize yield of each plot was converted, for intercropping system, in maize equivalent yield (MEY) which was computed by converting yield of intercrop into the yield of maize on the basis of prevailing market prices of individual crops as [30]:

$$\text{MEY} = Y_{\text{maize}} + Y_{\text{legume}} \times \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

where,  $Y_{\text{maize}}$  and  $Y_{\text{legume}}$  are the yield of maize and legume in an intercropping system and  $P_1$  and  $P_2$  are the selling price of maize and legume, respectively. The advantage of intercropping and the effect of competition between the two species used in a mixture were calculated using different competition indices. The land equivalent ratio (LER) was used as the criterion for mixed stand advantage as both vetch and cereal were desired species [31]. In particular, LER indicates the efficiency of intercropping for using the resources of the environment compared with monocropping [32]. The value of unity is the critical value. When the LER is greater than 1 the intercropping favors the growth and yield of the species. In contrast, when LER is lower than 1 the intercropping negatively affects the growth and yield of the plants grown in mixtures [33] [34]. The LER was calculated as:

$$\text{LER} = (\text{LER}_{\text{maize}} + \text{LER}_{\text{legumineuse}}) \quad (2)$$

$$\text{LER}_{\text{maize}} = (Y_{\text{ml}}/Y_{\text{m}}), \text{ et } \text{LER}_{\text{legumineuse}} = (Y_{\text{lm}}/Y_{\text{l}}) \quad (3)$$

where  $Y_{\text{l}}$  and  $Y_{\text{m}}$  are the yields of legumes and maize, respectively, as sole crops and  $Y_{\text{lm}}$  and  $Y_{\text{ml}}$  are the yields of legumes and maize as intercrops, respectively. The second index is the area time equivalent ratio (ATER) provides more realistic comparison of the yield advantage of intercropping over monocropping in terms of time taken by component crops in the intercropping systems. ATER was calculated by formula:

$$\text{ATER} = \frac{1}{T} \sum_1^n \frac{d * Y_i}{Y_m} \quad (\text{Hauggaard-Nielsen } et al., 2001) [10] \quad (4)$$

where  $Y_i$  and  $Y_m$  are yields of component crops in intercrop and monocrop system, respectively, and  $n$  is the number of crops involved.  $d$  is the growth period of the crop in days and  $T$  is the time in days for which the field remained occupied *i.e.* the growth period of the longest duration crop. Numerical values of ATER approaches that of LER for a mixture consisting of crops of approximately identical growth periods *i.e.* when  $t = d$  in comparison, productivity can also be expressed in terms of the resources use efficiency of the most limiting resource *e.g.*, water, nutrients, energy or till. The interpretation of ATER involves that  $ATER > 1$  implies yield advantage;  $ATER = 1$  implies of no effect of intercropping;  $ATER < 1$  shows yield disadvantage [10].

The relative crowding coefficient (RCC or K) is a measure of the relative dominance of one species over the other in a mixture [18] [35]. The K was calculated as:

$$K = (K_{\text{maize}} \times K_{\text{legume}}) \quad (5)$$

$$K_{\text{maize}} = Y_{ml} \times Z_{lm} / ((Y_m - Y_{ml}) \times Z_{ml}) \quad (6)$$

$$K_{\text{legume}} = Y_{lm} \times Z_{ml} / ((Y_l - Y_{lm}) \times Z_{lm}) \quad (7)$$

where  $Z_{ml}$  and  $Z_{lm}$  were the proportions of maize and legume in the mixture, respectively. When the value of K is greater than 1, there is a yield advantage; when K is equal to 1, there is no yield advantage; and when it is less than 1.00, there is a disadvantage [15].

The next index was aggressivity (A) which is often used to determine the competitive relationship between 2 crops used in the mixed cropping [28]. The aggressivity was formulated as follows [15]:

$$A_{\text{legume}} = (Y_{lm}/Y_l \times Z_{lm}) - (Y_{ml}/Y_m \times Z_{ml}) \quad (8)$$

$$A_{\text{maize}} = (Y_{ml}/Y_m \times Z_{ml}) - (Y_{lm}/Y_l \times Z_{lm}) \quad (9)$$

For cereal example: if  $A_{\text{maize}} = 0$ , both crops are equally competitive, if  $A_{\text{maize}}$  is positive, then the maize species is dominant, if  $A_{\text{maize}}$  is negative, then the maize is the dominated species. Also, competitive ratio (CR) is another way to assess competition between different species. The CR gives a better measure of competitive ability of the crops and is also advantageous as an index over K and A [15] [36]. The CR represents simply the ratio of individual LERs of the two component crops and takes into account the proportion of the crops in which they are initially sown [37]. The CR is calculated according to the following formula:

$$CR_{\text{maize}} = (LER_{\text{maize}} / LER_{\text{legume}}) (Z_{\text{legume-maize}} / Z_{\text{maize-legume}}) \quad (10)$$

$$CR_{\text{legume}} = (LER_{\text{legume}} / LER_{\text{maize}}) (Z_{\text{maize-legume}} / Z_{\text{legume-maize}}) \quad (11)$$

The next index that was used was the actual yield loss (AYL) index, which gave more accurate information about the competition than the other indices between and within the component crops and the behavior of each species in the intercropping system, as it is based on yield per plant [12]. The AYL is the pro-

portionate yield loss or gain of intercrops in comparison to the respective sole crop, *i.e.* it takes into account the actual sown proportion of the component crops with its sole stand. In addition, partial  $AYL_{legumes}$  or  $AYL_{maize}$  represent the proportionate yield loss or gain of each species when grown as intercrops, relative to their yield in sole crop [15]. The AYL [38] was calculated as:

$$AYL = AYL_{maize} + AYL_{legume} \quad (12)$$

$$AYL_{maize} = \left( \frac{Y_{ml}/Z_{ml}}{Y_m/Z_m} \right) - 1 \quad (13)$$

$$AYL_{legume} = \left( \frac{Y_{lm}/Z_{lm}}{Y_l/Z_l} \right) - 1 \quad (14)$$

The AYL can have positive or negative values indicating an advantage or disadvantage remained in intercrops when the main aim is to compare yield on a per plant basis. Moreover, none of the above competition indices provides any information on the economic advantage of the intercropping system. For this reason, the monetary advantage index (MAI) was calculated as:

$$MAI = \frac{(\text{value of combined intercrops}) \times (LER - 1)}{LER} \quad (15)$$

The higher the MAI value the more profitable is the cropping system [13]. Also, intercropping advantage (IA) was calculated using the following formula [12]:

$$IA_{maize} = AYL_{maize} \times P_{maize} \quad (16)$$

$$IA_{legume} = AYL_{legume} \times P_{legume} \quad (17)$$

where  $P_{maize}$  and  $P_{legume}$  are the commercial value of maize (the current price is 1000 FCD per kg) and legumes (the current price of cowpea and soybean are 1500 FCD per kg) respectively. Data were analyzed using R 3.1.3 (2015) following standard Analysis of Variance procedures, and least significant difference (LSD) test at 5% probability level was used to compare all varieties of maize and each treatment means. Principal component analysis (PCA) was used to represent the correlations between yield and competitiveness—monetary indices was carried out to show the profitability of DMC systems.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Yield and the Maize Equivalent Yield Index

Regarding maize grain yield, a highly significant difference was observed ( $p < 0.001$ ) between treatments (Table 1). Monocrop was higher ( $2350.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), compared to intercrops ( $1342.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  for cowpea and  $2081.9 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  for soybean). Therefore, the best yield was recorded in monocrop of Samaru with  $2849.44 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . This is similar to that obtained by KASETSART [39] in trials at the SUWAN farm in Thailand, where the yield of maize grown in monoculture was 31.9% higher than maize + soybean intercrop. A reasonable leaf area index (LAI) is essential to maintain high photosynthesis and yield [40]. Prasad and Brook [41] reported that the increase in maize density had a significant effect on LAI in maize-soya intercropping.

**Table 1.** Grain yield and maize equivalent yield (MEY) in sole and intercropping treatments.

Varieties	Treatments	Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )		Total Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )	Maize equivalent Yield (kg·ha <sup>-1</sup> )
		Maize	Legumes		
07SADVE	monoculture	2665.86 a	-	2665.86 a	2665.86 ab
08SADVE1	monoculture	2129.52 a	-	2129.52 a	2129.52 ab
09SADVEF2	monoculture	2128 a	-	2128 a	2128 ab
MUD1	monoculture	2402.4 a	-	2402.4 a	2402.4 ab
MUD3	monoculture	2283.62 a	-	2283.62 a	2283.62 ab
SAMARU	monoculture	2849.44 a	-	2849.44 a	2849.44 ab
VP0538	monoculture	2277.22 a	-	2277.22 a	2277.22 ab
ZM523	monoculture	2065.53 a	-	2065.53 a	2065.53 ab
<b>means</b>	<b>monoculture</b>	<b>2350.20 a</b>	-	<b>2350.20 a</b>	<b>2350.20 ab</b>
<b>Niébé</b>	<b>monoculture</b>	-	<b>178.2 b</b>	<b>178.2 b</b>	-
<b>Soya</b>	<b>monoculture</b>	-	<b>1802.23 a</b>	<b>1802.23 a</b>	-
07SADVE	niébé	1999.73 a	76 c	2075.73 abc	2050.39
08SADVE1	niébé	1298.92 a	15.78 c	1314.7 bc	1309.44
09SADVEF2	niébé	965.13 a	39.67 c	1004.8 bc	991.57
MUD1	niébé	753.6 ab	38.29 c	791.89 c	779.13
MUD3	niébé	1351.04 a	19.78 c	1370.82 bc	1364.23
SAMARU	niébé	2028.88 a	96.14 c	2125.02 ab	2057.14
VP0538	niébé	1133.73 a	33.28 c	1167.01 bc	1155.92
ZM523	niébé	1212.45 a	68.2 c	1280.65 bc	1227.92
<b>means</b>	<b>niébé</b>	<b>1342.94 c</b>	<b>48.39 c</b>	<b>1391.33 bc</b>	<b>1381.65 b</b>
07SADVE	soya	2206.49 a	546.92 b	2753.41 a	2571.10
08SADVE1	soya	2040.76 a	932.37 a	2973.13 a	2662.34
09SADVEF2	soya	1843.63 a	885.49 a	2729.12 a	2433.95
MUD1	soya	2113.15 a	859.44 a	2972.59 a	2686.11
MUD3	soya	2291.12 a	817.77 a	3108.89 a	2836.30
SAMARU	soya	2113.9 a	718.81 ab	2832.71 a	2593.11
VP0538	soya	1984.68 a	838.61 a	2823.29 a	2543.75
ZM523	soya	2062.06 a	875.07 a	2937.13 a	2645.44
<b>means</b>	<b>soya</b>	<b>2081.97 b</b>	<b>809.31 a</b>	<b>2891.28 a</b>	<b>3295.94 a</b>
<b>α varieties</b>		ns	**	ns	ns
<b>α treatments</b>		**	***	***	***
<b>α varieties x treatments</b>		ns	**	ns	ns

Means followed by the same letter in the columns do not differ by Tukey test ( $p \leq 0.05$ ); Statistical significance level: 0 “\*\*\*” 0.001 “\*\*” 0.01 “\*” 0.05 “+” 0.1 “ns” 1.



Variances analyses of legumes yield showed a highly significant difference ( $p < 0.001$ ) between the treatments and significant difference ( $p < 0.05$ ) between the interactions and varieties (**Table 1**). The soybean monocrop yield was greater ( $1802.23 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) than yield in maize intercrop ( $809.31 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). And then, the sole yield of cowpea was higher ( $178.2 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) than yield in maize intercrop ( $48.39 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ). Hardter *et al.* [42] has already reported these, although maize and cowpea intercrop was lower than in rotation, sole crop continuously have lower productivities. While the pure leguminous plant cultures maintained their superiority on the mixed farming system only for soybean, the same proportion (50% of soybean and 50% of cowpea) used in monoculture put in association, increased the outputs in grains of each variety of maize, but decreased those of soybean and increased that of cowpea.

The highest total mixed crop yield was obtained when Mudishi 3 was mixed with soybean ( $3108.89 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) (**Table 1**). MEY was to calculate and was higher in the system of soybean intercrop (**Table 1**) compared with monocultures.

Maize intercrops with soybean and cowpea had obtained higher maize equivalents yields than the total intercrops yields (**Table 1**). This can be allotted to the complementary effect of legumes in intercropping system by the nutritive transfer. Similar results were obtained by Ofori and Stern [33].

### 3.2. Land Equivalent Ratio, Area Time Equivalent Ratio and Relative Crowding Coefficient

Various competitive relationship of intercropping were computed and presented in **Table 2**. Results showed that maize partial LER were higher than 0.50 for all intercrops which indicates that there was an advantage for maize, except for Mudishi 1-cowpea (0.31) and VP0538-cowpea (0.46). The variance analysis showed that there was significant difference between Treatments ( $p < 0.05$ ) for  $LER_{\text{maize}}$ . On the other hand, all partial LER of cowpea was lower than 0.5 except intercrops with 07SADVE, Samaru and VP0538 which indicates that there was a disadvantage for cowpea. The partial LER of soybean were higher than 0.5 for all intercrops which indicates that there was an advantage for soybean [19], except intercrops with 07SADVE and Samaru.

LER showed the positive influences on growth and yield of maize and legumes intercrops ( $LER > 1$ ) in maize-soybean intercrops with the greater for 08SADVE 1-soybean (1.66). This indicates that 66% (0.66 ha) more area would be required by a sole cropping system to equal the yield of intercropping system [25]. In these cases, total LER was significantly different ( $P < 0.01$ ) and values were higher than one showing the advantage of intercropping over sole stands in regard to the use of environmental sources for plant growth [32]. Similar results were reported for mix-proportions of pea-barley [19], bean-wheat [10], and maize-faba bean [43]. Partial LER values also showed that, compared to soybean, cowpea appears to have more beneficial land use efficiency in all mixtures.

LER doesn't consider the duration of the crops in the field and it is based on the harvested products, and not on desired yield proportion of the component

**Table 2.** Land equivalent ratio (LER), area time equivalency ratio (ATER), relative crowding coefficient (RCC or K), aggressivity (A) and competitive ratio (CR) for mixtures of height maize varieties and legumes (soybean and cowpea).

Varieties	Treatment	LER			ATER	RCC or K			A		CR	
		LER <sub>maize</sub>	LER <sub>legumes</sub>	Total		K <sub>maize</sub>	K <sub>legumes</sub>	Total	A <sub>maize</sub>	A <sub>legumes</sub>	CR <sub>maize</sub>	CR <sub>legumes</sub>
07SADVE	cowpea	0.76 ab	0.63	1.39	1.32	60.32	3.41	172.72	0.173	-0.17	20.96	0.09
08SADVE1	cowpea	0.57 ab	0.12	0.70	0.64	59.24	0.016	1.67	0.14	-0.14	56.22	0.032
09SADVEF2	cowpea	0.63 ab	0.26	0.89	0.83	-2.86	0.11	0.80	0.15	-0.15	98.63	0.071
Mudishi1	cowpea	0.31 b	0.38	0.69	0.66	4.62	0.12	0.62	0.068	-0.067	16.42	0.17
Mudishi3	cowpea	0.61 ab	0.16	0.77	0.72	140.34	0.025	8.39	0.15	-0.15	57.96	0.033
Samaru	cowpea	0.73 ab	0.66	1.39	1.32	-361.93	0.010	79.45	0.16	-0.16	30.27	0.093
VPO538	cowpea	0.46 ab	0.31	0.78	0.73	39.23	0.057	3.38	0.11	-0.11	13.79	0.084
ZM523	cowpea	0.61 ab	0.56	1.16	1.11	-2.66	-0.048	3.93	0.14	-0.14	35.34	0.087
07SADVE	soybean	0.84 ab	0.38	1.22	1.15	-65.92	0.104	0.71	0.20	-0.20	25.70	0.053
08SADVE1	soybean	1.00 a	0.67	1.66	1.57	-71.98	0.098	76.31	0.23	-0.23	17.10	0.07
09SADVEF2	soybean	0.98 ab	0.58	1.56	1.47	32.26	0.26	11.03	0.23	-0.23	19.72	0.088
Mudishi1	soybean	0.89 ab	0.59	1.48	1.40	147.01	0.45	-10.04	0.21	-0.21	16.73	0.070
Mudishi3	soybean	1.00 a	0.54	1.55	1.46	93.77	0.22	30.55	0.24	-0.24	19.78	0.06
Samaru	soybean	0.73 ab	0.46	1.19	1.13	56.01	0.14	4.47	0.17	-0.17	18.05	0.074
VPO538	soybean	0.90 ab	0.56	1.45	1.37	271.71	0.26	24.84	0.21	-0.21	16.12	0.067
ZM523	soybean	0.96 ab	0.57	1.53	1.44	2.22	0.24	8.14	0.22	-0.22	18.04	0.086
$\alpha$ varieties		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
$\alpha$ treatments		***	ns	***	**	ns	ns	ns	***	***	ns	ns
$\alpha$ varieties x treatments		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Means followed by the same letter in the columns do not differ by Tukey test ( $p \leq 0.05$ ); Statistical significance level: 0 “\*\*\*\*” 0.001 “\*\*\*” 0.01 “\*\*” 0.05 “+” 0.1 “ns” 1.

crops. Moreover, the choice of sole cropped yield for standardizing mixture yield in the estimation of LER is not clear [28], therefore, area time equivalent ratio (ATER) provides more realistic comparison of the yield advantage of intercropping over sole cropping in terms of variation in time taken by the component crops of different intercropping systems [44].

The data presented in Table 2 showed that in all maize-legumes intercropping arrangements, the ATER values were lesser than LER values indicating the over estimation of resource utilization perhaps due to the wide variations in the maturity periods of the crops of which maize stayed longer on the land and had enough time to compensate for the legumes competition. ATER is free from problems of over estimation of resource utilization contrary to LER. ATER values showed an advantage of 57% in 08SADVE 1-soybean (Table 2). This could be due to the reason of a significant effect on LAI in maize-soybean intercropping [41].

Although a statistical comparison among the partial K values of legumes and

maize was not performed, it seems that the maize partial K was higher than legumes partial K in the case of the maize-cowpea mixtures and in maize-soybean mixture, indicating that maize is more competitive than its associated crop, except the cowpea intercropped with 09SADVE F2, Samaru and ZM523, and the soybean intercropped with 07SADVE and 08SADVE1 (**Table 1**). Similar results reported by Banik *et al.* [12] in chickpea-wheat intercropping and Dhima *et al.* [15] in cereal-vetch intercropping. The total K was above one in the case of all intercrops with cowpea and soybean, which indicates a definite yield advantage due to intercropping [12]. However, in the maize-cowpea mixture (09SADVE F2 and Mudishi 1) and in maize-soybean mixtures (07SADVE and Mudishi 1), the total K was below one, which indicates that there was a yield disadvantage [13] [36]. K values followed a similar trend with the LER values.

### 3.3. Aggressivity, Competitive Ratio and Actual Yield Loss

In all mixture, positive  $A_{\text{maize}}$  values showed that maize was the dominant species (**Table 2**). Intercropped maize had higher competitive ratios (CRs) in all mixtures; however, cowpea had higher CR values than those of soybean with 09SADVE F2 (98.63), Mudishi 3(57.96) and 08SADVE1 (56.22) varieties. The results of competitive ratio index were also in corroboration with those of the aggressivity index. The values of A and CR for cowpea were indicated that cowpea was more competitive than soybean in maize mixtures. According to Yilmaz *et al.* [22], although increasing the cereal rate in mixtures elevated the crowding efficiency over legumes, doubling the rate per se may commence competition among maize plants, which probably resulted in weaker growth, thereby, lower CR and  $A_{\text{maize}}$  values. This was also confirmed with the negative  $AYL_{\text{maize}}$  values that were negative only when the maize ratio was the highest (**Table 3**). This was probably due to the fact that nitrogen fixing ability of the legumes did not compensate vigorous growth of cereals over a certain proportion.

In particular,  $AYL_{\text{maize}}$  had positive and the higher value only in Mudishi 3-soybean intercropping, it was increase yield in this association with 0.41% (0.0041) yield advantage compared to sole cropping. Which indicate a yield advantage for maize probably because of the positive effect of soybean on Mudishi 3 variety when grown in intercropping [12] [38]. According to Banik *et al.* [12], the AYL index can give more precise information than the other indices on the inter- and intra-specific competition of the component crops and the behavior of each species involved in the intercropping systems. Quantification of yield loss or gain due to intercropping with other species or the variation of the plant population could not be obtained through partial LERs, whereas partial AYL shows the yield loss or gain by its sign and as well as its value.

### 3.4. Intercropping Advantages and Monetary Advantage Indexes

Monetary advantage index followed the trend similar to LER (**Table 3**). The MAI values were positive under maize-soybean intercropping system (**Table 3**), which shows a definite yield advantage compared with the other intercropping

**Table 3.** Actual yield loss (AYL), intercropping advantage (IA) and monetary advantage index (MAI) for mixtures of height maize varieties and legumes (soybean and cowpea).

Varieties	Treatments	AYL			IA			MAI
		Maize	Legumes	Total	Maize	Legumes	Total	
07SADVE	cowpea	-0.24 b	-0.37	-0.61 abc	-240.25 b	-559.56	-799.81 abc	542.65 abcd
08SADVE1	cowpea	-0.43 b	-0.88	-1.30 c	-428.30 b	-1314.39	-1742.69 c	-396.14 cd
09SADVEF2	cowpea	-0.37 b	-0.74	-1.11 abc	-370.79 b	-1108.23	-1479.05 abc	-443.62 d
Mudishi1	cowpea	-0.69 b	-0.62	-1.31 c	-687.57 b	-933.85	-1621.43 bc	-315.78 bcd
Mudishi3	cowpea	-0.39 b	-0.84	-1.23 bc	-390.83 b	-1255.86	-1646.69 bc	-396.60 cd
Samaru	cowpea	-0.27 b	-0.34	-0.61 abc	-270.12 b	-515.30	-785.42 abc	404.19 abcd
VPO538	cowpea	-0.54 b	-0.69	-1.22 bc	-539.69 b	-1027.95	-1567.64 abc	-205.75 abcd
ZM523	cowpea	-0.39 b	-0.44	-0.84 abc	-391.47 b	-667.36	-1058.84 abc	-45.94 abcd
07SADVE	soybean	-0.16 a	-0.62	-0.78 abc	-159.21 a	-924.43	-1083.63 abc	353.93 abcd
08SADVE1	soybean	0.00 a	-0.33	-0.34 a	-2.76 a	-500.99	-503.76 a	917.03 a
09SADVEF2	soybean	-0.02 a	-0.42	-0.44 ab	-24.63 a	-628.57	-653.19 ab	752.41 ab
Mudishi1	soybean	-0.11 a	-0.41	-0.52 abc	-107.29 a	-620.89	-728.17 abc	742.39 ab
Mudishi3	soybean	0.0041 a	-0.46	-0.45 ab	4.11 a	-686.30	-682.18 abc	922.92 a
Samaru	soybean	-0.27 b	-0.54	-0.81 abc	-265.78 a	-817.41	-1083.19 abc	353.38 abcd
VPO538	soybean	-0.10 a	-0.44	-0.55 abc	-104.23 a	-663.66	-767.88 abc	694.48 abc
ZM523	soybean	-0.04 a	-0.43	-0.47 ab	-39.89 a	-645.7	-685.59 abc	913.41 a
α varieties		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
α treatments		***	ns	**	***	ns	**	***
α varieties x treatments		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Means followed by the same letter in the columns do not differ by Tukey test ( $p \leq 0.05$ ); Statistical significance level: 0 “\*\*\*\*” 0.001 “\*\*\*” 0.01 “\*\*” 0.05 “\*” 0.1 “ns” 1.

systems tested in this study. In particular, the highest positive MAI values were for the Mudishi 3-soybean (+922.92), 08SADVE1-soybean (+917.03) and ZM523-soybean (+913.41). The lowest monetary benefit was recorded in SAMARU-soybean (+353.38). The other intercropping with cowpea showed negative MAI values, except 07SADVE-cowpea (+542.65) and SAMARU-cowpea (+404.19). Similarly, the IA, which is also an indicator of the economic feasibility of intercropping systems, indicated that most advantageous mixture was only for maize in Mudishi 3-soybean (+4.11). The fact that MAI and IA values were positive indicates that these intercropping systems had the highest economic advantage, whereas all the other mixtures, which had negative values, showed an economic disadvantage. These findings were also in agreement with the results of LER and the other competition indices (Table 1 and Table 2). Similarly, Ghosh [13] found that when the LER and K were higher there is also significant economic benefit expressed with

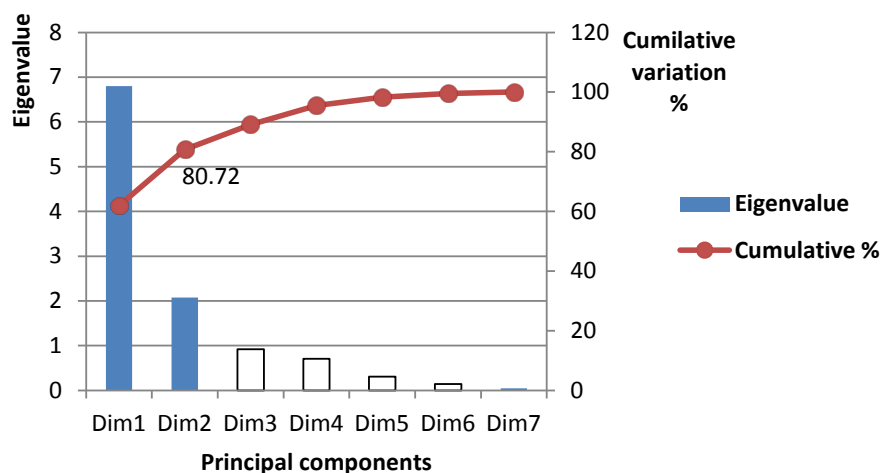
higher MAI values.

The differences found between mixtures in this study can be attributed to aggressivity of maize and to other factors such as morphology, physiology and the different requirements for nutrients. In particular, the growing maize intercropped with cowpea can affect nitrogen fixation because of reduced light interception of cowpea due to shading by maize. This can result in poor nodulation, growth and competitive ability of cowpea compared to soybean in these mixtures. Also, the advantages of the intercropping systems found in this study can be attributed to the better utilization of growth resources [33]. For example, Osunde *et al.* [45] found that without the addition of fertilizer the proportion of N derived from N<sub>2</sub>-fixation was about 40 percent in the intercropped soybean and 30 percent in the sole crop, and with application of 40 kg·N·ha<sup>-1</sup> N<sub>2</sub>-fixed by the sole cropped soybean was significantly greater than that fixed by intercropped system. However, to *find* out the real causes of these differences among mixtures examined in this study further research is required to study those factors.

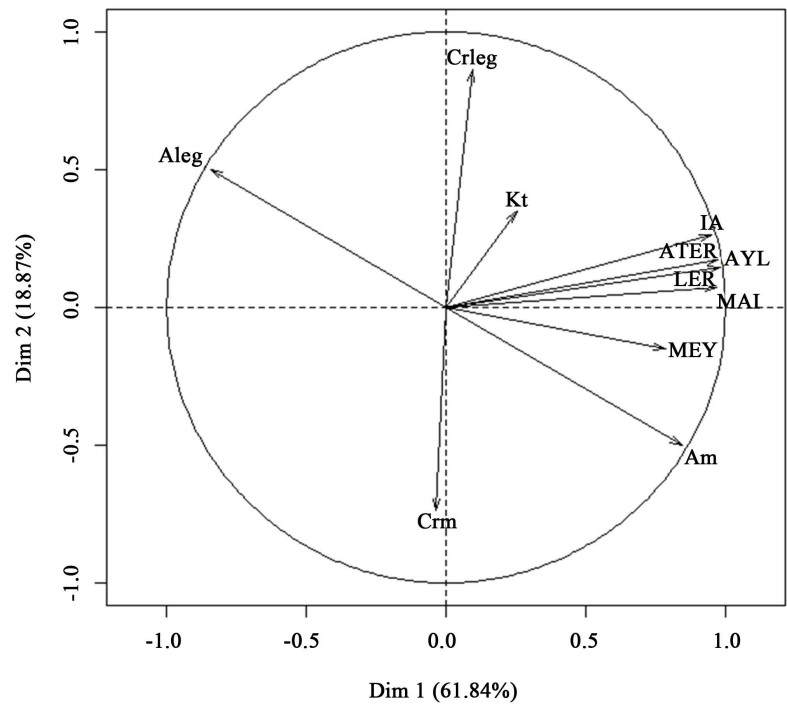
#### 4. Principal Component Analysis

In **Figure 2**, eigenvalues of principal components and percentage of the accumulated variable variance carried by them are given. For further analysis according to Keiser's criterion, first two components were >1 (Dim1 and Dim2). Those two principal components, which are a linear combination of the input data, explain over 80.72% of total variability.

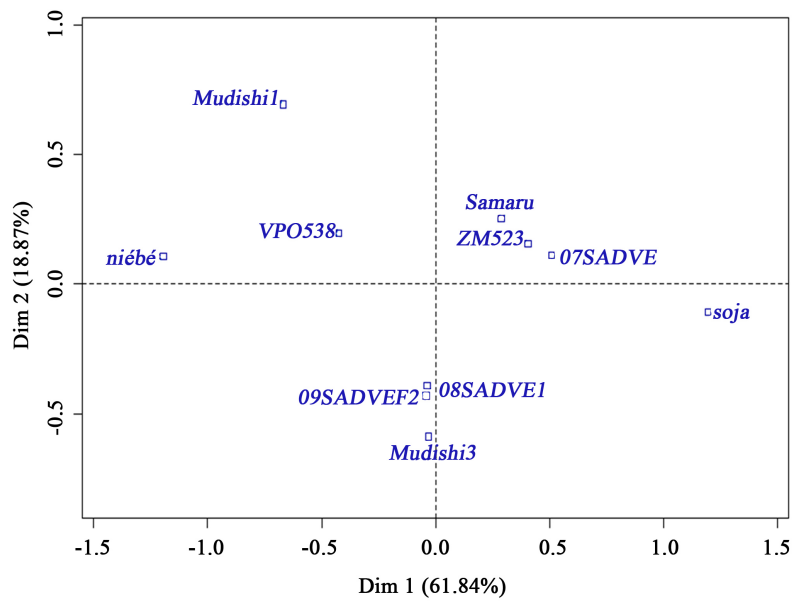
The results of **Figure 3** showed that dim1 opposes maize-soybean intercrops to maize-cowpea intercrops. Maize-soybean intercrops is characterized by the LER, Am, Aleg, CRm, CRleg, ATER, MEY, MAI, AYL and IA indices, against maize-cowpea intercrops characterized by the Aleg index. As for Dim2, it opposes intercrops in terms of competitiveness. This dimension is characterized by two groups of more competitive maize varieties (09SADVE F2, 08SADVE 1 and Mudishi 3) and less competitive (Mudishi 1).



**Figure 2.** Scree plot.



(a)



(b)

**Figure 3.** (a) Plane projection of the variables generated by the ACP of the studied parameters; (b) Varieties Distribution generated by Dim 1 and Dim 2 axes according to the ACP of parameters studied.

On the other hand, maize-soybean intercrops have had significant advantages, as confirmed by economic values (MAI) and land use efficiency (LER). The Mudishi 3 variety showed greater aggressiveness on cowpea and lower aggressiveness on soybeans. Mudishi 3-soya had the greatest monetary advantage, although the AI index was negative.

## 5. Conclusion

The present study concludes that intercropping of maize with cowpea and soybean may affect seed yield, competition between the 2 species (maize and legumes), and economics of mixtures as compared to solitary cropping of the same species. Regardless of various varieties, maize-cowpea or maize-soybean intercropping had the yield advantages of intercropping and optimum exploitation of the environmental resources as opposed to other intercropping systems. Additionally, these 2 intercropping systems were observed to be the most profitable. Furthermore, cowpea intercropped with maize was more competitive than soybean. Generally, maize was the dominant species in all mixtures. Although legumes had lower yield in mixture but are more expensive in markets, solitary planting of them would not reach the profitable level gained with maize or other cereals cited in literature. On the other hand, mixtures with maize and soybean resulted in significant advantages of intercropping as confirmed by the economic and land use efficiency values. Mudishi 3 variety showed highest aggressivity for cowpea intercrop and lowness competitiveness for soybean intercrop. Mudishi 3-soybean presented the greatest monetary advantage, although the intercrop advantage index was negative. Such a system can be easily practiced especially by peasants from the lower region in DR Congo, as well as in other countries that have similar climate. Therefore, with a higher socio-economic return for farming system, as well as soil conservation can be improved in such environments.

## Acknowledgements

We would like to thank the staff of The National Institute of Study and Research Agronomy (INERA) and The International Institute of Tropical Agriculture (IITA) for this financial support.

## References

- [1] Giller, K.E. and Wilson, K.J. (1991) Nitrogen Fixation in Tropical Cropping Systems. CAB International, Wallingford, England, 167-237.
- [2] Puckridge, D.W. and French, R.J. (1983) The Annual Legume Pasture in Cereal Ley-Farming Systems of Southern Australia: A Review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **9**, 229-267. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(83\)90100-7](https://doi.org/10.1016/0167-8809(83)90100-7)
- [3] Machet, J.M., Laurent, F., Chapot, J.Y., Doré, T. and Dutroux, A. (1997) Maîtrise de l'azote dans les intercultures et les jachères. [Mastery of Nitrogen in Intercultures and Fallows.] In: INRA, Ed., *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes [Nitrogen Control in Agrosystems]*, Symposiums, N83, 271-288.
- [4] FAO (2005) Regards sur l'agriculture de conservation en Afrique de l'ouest et du centre et ses perspectives. Contribution au 3<sup>ème</sup> Congrès mondial d'agriculture de conservation à Nairobi, Rome, Italie, 114. [Perspectives on Conservation Agriculture in West Africa and Center and Its Perspectives. *Contribution to the 3rd World Agriculture Congress of Conservation in Nairobi*, Rome, Italy, 114.]
- [5] Masson, P. and Bertoni, G. (1996) Essai d'enherbement d'un vignoble méridional à base de trèfle souterrain: Synthèse de six années d'expérimentation. In: *XI Kollo-*

- quium Begrünung im Weibau, Internationaler Arbeitskreis im Weinbau, Kaltern-Sud Tyrol, Italie, 28-31 août 1996.*
- [6] Thurston, D.H. (1997) *Slash and Mulch Systems. Sustainable Methods for Tropical Agriculture*. Westview Press, London, 196 p.
- [7] Azontonde, A., Feller, C., Ganry, F. and Remy, J.C. (1998) Le mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferrallitique au Sud du Bénin. [Mucuna and Restoration Properties of a Ferralitic Soil in Southern Benin.] *Agriculture et Développement*, **18**, 55-62.
- [8] Capillon, A. and Séguy, L. (2002) Ecosystèmes cultivés et stockage du carbone. cas des systèmes de culture en semis direct avec couverture végétale. [Cultivated Ecosystems and Carbon Storage. Case Direct Sowing Systems with Vegetal Cover.] *C.R. Acad. Agri. Fr.*, **88**, 63-70.
- [9] CIALCA (2008) Rapport d'avancement 4-Bujumbura, Amélioration des moyens de vie basés sur l'agriculture en Afrique Centrale par le biais d'une productivité de systèmes durablement accrue en vue d'améliorer les revenus, la sécurité alimentaire et l'environnement. *Réunion de lancement de CIALCA-II*, Bujumbura, du 28 au 31 octobre 2008, 28. [Progress Report 4-Bujumbura, Improving the Means to Based on Agriculture in Central Africa through a Productivity of Sustainable Systems in Order to Improve Incomes, Food Security and the Environment. *CIALCA-II Launch Meeting*, Bujumbura, 28-31 October 2008, 28.]
- [10] Hauggaard-Nielsen, H., Ambus, P. and Jensen, E.S. (2001) Evaluating Pea and Barley Cultivars for Complementary in Intercropping at Different Levels of Soil N Availability. *Field Crops Research*, **72**, 185-196.  
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(01\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(01)00176-9)
- [11] Tsubo, M., Walker, S. and Ogindo, H.O. (2005) A Simulation Model of Cereal-Legume Intercropping Systems for Semi-Arid Regions. II. Model Application. *Field Crops Research*, **93**, 23-33.
- [12] Banik, P., Sasmal, T., Ghosal, P.K. and Bagchi, D.K. (2000) Evaluation of Mustard (*Brassica campestris* var. Toria) and Legume in 1:1 and 2:1 Replacement Series System. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **185**, 9-14.  
<https://doi.org/10.1046/j.1439-037X.2000.00388.x>
- [13] Ghosh, P.K. (2004) Growth, Yield, Competition and Economics of Groundnut/Cereal Fodder Intercropping Systems in the Semi-Arid Tropics of India. *Field Crops Research*, **88**, 227-237.
- [14] Agegnehu, G., Ghizam, A. and Sinebo, W. (2006) Yield Performance and Land-Use Efficiency of Barley and Faba Bean Mixed Cropping in Ethiopian Highlands. *European Journal of Agronomy*, **25**, 202-207.
- [15] Dhima, K.V., Lithourgidis, A.A., Vasilakoglou, I.B. and Dordas, C.A. (2007) Competition Indices of Common Vetch and Cereal Intercrops in Two Seeding Ratio. *Field Crops Research*, **100**, 249-256.
- [16] Anil, L., Park, J., Phipps, R.H. and Miller, F.A. (1998) Temperate Intercropping of Cereals for Forage: A Review of the Potential for Growth and Utilization with Particular Reference to the UK. *Grass and Forage Science*, **53**, 301-317.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.1998.00144.x>
- [17] Poggio, S.L. (2005) Structure of Weed Communities Occurring in Monoculture and Intercropping of Field Pea and Barley. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **109**, 48-58.
- [18] Banik, P., Midya, A., Sarkar, B.K. and Ghose, S.S. (2006) Wheat and Chickpea Intercropping Systems in an Additive Series Experiment: Advantages and Weed



- Smothering. *European Journal of Agronomy*, **24**, 325-332.
- [19] Chen, C., Westcott, M., Neill, K., Wichman, D. and Knox, M. (2004) Row Configuration and Nitrogen Application for Barley-Pea Intercropping in Montana. *Agronomy Journal*, **96**, 1730-1738. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.1730>
- [20] Fenandez-Aparicio, M., Josefina, C. and Sillero, D.R. (2007) Intercropping with Cereals Reduces Infection by *Orobanche crenata* in Legumes. *Crop Protection*, **26**, 1166-1172.
- [21] Tsubo, M., Walker, S. and Mukhala, E. (2001) Comparisons of Radiation Use Efficiency of Mono-Inter-Cropping Systems with Different Row Orientations. *Field Crops Research*, **71**, 17-29.
- [22] Yilmaz, S., Atak, M. and Erayman, M. (2008) Identification of Advantages of Maize-Legume Intercropping over Solitary Cropping through Competition Indices in the East Mediterranean Region. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 111-119.
- [23] Hiebesch, C.K. and McCollum, R.E. (1987) Area  $\times$  Time Equivalency Ratio: A Method for Evaluating the Productivity of Intercrops. *Agronomy Journal*, **79**, 15-22. <https://doi.org/10.2134/agronj1987.00021962007900010004x>
- [24] Hiebesch, C.K. (1980) Principles of Intercropping: Effect of N Fertilization and Crop Duration on Equivalency Ratios in Intercrops versus Monoculture Comparisons. PhD Thesis, North Carolina State University, Raleigh.
- [25] Midya, A., Bhattacharjee, K., Ghose, S.S. and Banik, P. (2005) Deferred Seeding of Blackgram (*Phaseolus mungo* L.) in Rice (*Oryza sativa* L.) Field on Yield Advantages and Smothering of Weeds. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **191**, 195-201. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2005.00157.x>
- [26] Lithourgidis, A.S., Valchostergios, D.N., Dordas, C.A. and Damalas, C.A. (2011) Dry Matter Yield, Nitrogen Content, and Competition in Pea-Cereal Intercropping Systems. *European Journal of Agronomy*, **34**, 287-294.
- [27] Weigelt, A. and Jolliffe, P. (2003) Indices of Plant Competition. *Journal of Ecology*, **91**, 707-720. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00805.x>
- [28] Willey, R.W. (1979) Intercropping Its Importance and Research Needs. I. Competition and Yield Advantages. *Field Crop Abstracts*, **32**, 1-10.
- [29] Paliwal, L.R., Granados, G., Violic, A.D., Lafitte, H.R. and Marathe, J.P. (2002) Le maïs en zones tropicales: Amélioration et production. [Maize in Tropical Zones: Improvement and Production.] Food & Agriculture Org., 382 p.
- [30] Anuaneyulu, V.R., Singh, S.P. and Pla, M. (1982) Effect of Competition Free Period and Technique and Pattern of Pearl Millet Planting on Growth and Yield of Mungbean and Total Productivity in Solid Pearl Millet and Pearl Millet/Mungbean Intercropping System. *Indian Journal of Agronomy*, **27**, 219-226.
- [31] Willey, R.W. and Osiru, D.S. (1972) Studies on Mixtures of Maize and Beans (*Phaseolus vulgaris*) with Particular References to Plant Population. *The Journal of Agricultural Science*, **79**, 519-529. <https://doi.org/10.1017/S0021859600025909>
- [32] Mead, R. and Willey, R.W. (1980) The Concept of a "Land Equivalent Ratio" and Advantages on Yields from Intercropping. *Experimental Agriculture*, **16**, 217-228. <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>
- [33] Ofori, F. and Stern, W.R. (1987) Cereal Legume Intercropping System. *Advances in Agronomy*, **41**, 41-90.
- [34] Caballero, R., Goicoechea, E.L. and Hernaiz, P.J. (1995) Forage Yields and Quality of Common Vetch and Oat Sown at Varying Seeding Ratios and Seeding Rates of

- Common Vetch. *Field Crops Research*, **41**, 135-140.
- [35] De Wit, C.T. (1960) On Competition. *Verslagen Landbouwkundige Onderzoekingen*, **66**, 1-82.
- [36] Willey, R.W. and Rao, M.R. (1980) A Competitive Ratio for Quantifying Competition between Intercrops. *Experimental Agriculture*, **16**, 117-125.  
<https://doi.org/10.1017/S0014479700010802>
- [37] Esmaeili, A., Sadeghpour, A., Hosseini, S.M.B., Jahanzad, E., Chaichi, M.R. and Hashemi, M. (2011) Evaluation of Seed Yield and Competition Indices for Intercropping Barley (*Hordeum vulgare*) and Annual Medic (*Medicago scutellata*). *International Journal of Plante Production*, **5**, 395-404.
- [38] Banik, P. (1996) Evaluation of Wheat (*Triticum aestivum*) and Legume Intercropping under 1:1 and 2:1 Row-Replacement Series System. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **176**, 289-294.  
<https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1996.tb00473.x>
- [39] Kasetsart University (1989) Annual Report. Department of Agronomy and National Corn and Sorghum Research Center, Bangkok.
- [40] Xiaolei, S. and Zhifeng, W. (2002) The Optimal Leaf Area Index for Cucumber Photosynthesis and Production in Plastic Green House. *ISHS Acta Horticulturae* 633. [http://www.actahort.org/books/633/633\\_19.htm](http://www.actahort.org/books/633/633_19.htm)
- [41] Prasad, R.B. and Brook, R.M. (2005) Effect of Varying Maize Densities on Intercropped Maize and Soybean in Nepal. *Experimental Agriculture*, **41**, 365-382.  
<https://doi.org/10.1017/S0014479705002693>
- [42] Hardter, R., Horst, W.J., Schmidt, G. and Frey, E. (1991) Yields and Land Use Efficiency of Maize-Cowpea Crop Rotations in Comparison to Mixed and Monocropping on an Alfisol in Northern Ghana. *Journal of Agronomy and Crop Science*, **166**, 326-337. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1991.tb00922.x>
- [43] Li, L. (1999) Interspecific Facilitative and Competitive Interactions between Intercropped Species in Intercropping Systems. PhD Dissertation, China Agricultural University, Beijing.
- [44] Aasim, M., Umer, E.M. and Karim, A. (2008) Yield and Competition Indices of Intercropping Cotton (*Gossypium hirsutum* L.) using Different Planting Patterns. *Tarim Bilimleri Dergisi*, **14**, 326-333. [https://doi.org/10.1501/Tarimbil\\_0000001048](https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001048)
- [45] Osunde, A.O., Tsado, P.A., Bala, A. and Sanginga, N. (2004) Productivity of a Maize-Promiscuous Soybean Intercrops as Affected by Fertilizer in the Southern Guinea Savanna Zone of Nigeria. *West African Journal of Applied Ecology*, **5**, 2004.

## **Etude et modélisation de la productivité des systèmes de culture basé sur le semis direct sous couvert végétal dans la savane du sud-ouest de la République Démocratique du Congo, « Cas de Mvuazi »**

**Mots clés : Maïs, semis direct, plante de couverture, associations des cultures, Indices de compétition, Indices de surface foliaire.**

En agriculture de conservation, le système de semis direct sous couvert végétal mort ou vif (SCV), qui est une nouvelle approche de l'agriculture qui s'inspire de l'écosystème forestier, assure une bonne productivité des surfaces cultivées et donne beaucoup d'avantages dans la gestion du sol. Cette thèse se propose d'accroître les connaissances scientifiques sur le fonctionnement des systèmes de culture d'association et de rotation dans un sol non travaillé, des cultures de rente prise en compte qui sont le maïs comme céréale ainsi que le niébé et le soja comme légumineuses en zone tropicale dans la savane du sud-ouest de la RD Congo, précisément à l'INERA/Mvuazi. Le travail repose sur une série d'expérimentations sur les SCV proposant de nouveaux systèmes de culture pouvant répondre à une triple attente : la productivité agricole, la rentabilité économique et le respect de l'environnement.

Nos résultats ont confirmé l'intérêt de ces systèmes pour améliorer le rendement des cultures de maïs en association et en rotation avec des légumineuses sur la base des principes de fonctionnement des SCV par la détermination de la combinaison optimisant la production en grains et la biomasse totale du système. Les rendements élevés de chaque culture enregistrée au cours de cette étude ont occasionné des bénéfices importants en augmentant leurs ratios que se soit en culture d'association ou en rotation. Grâce aux indices de compatibilité, une sélection plus avancée des variétés est possible, afin d'identifier les variétés compatibles au système de culture intercalaire et qui sont observés comme les plus rentables. La valeur économique d'une association est plus élevée par rapport à la monoculture du fait que les légumineuses sont plus chères sur le marché, permettant à l'association maïs-légumineuse d'atteindre un niveau de productivité plus élevé par rapport à la monoculture.

Ce travail a aussi contribué au développement d'outils méthodologiques pour étudier le fonctionnement des associations par les rapports des approches mathématiques ou modèles simulant la plantation pour la culture d'association céréale-légumineuse. Montrant ainsi que la compétition qui existe dans la culture mixte pourrait être l'aspect principal affectant le rendement par rapport à l'implantation des monocultures des céréales. La modification de l'arrangement spatial du système de culture d'association en intercalaire vers l'association en bande a permis de réduire la perte de rendement qui était de 78,06% pour l'association en intercalaire à 43,59% pour l'association en bande. Cela démontre que la meilleure combinaison d'espacement des lignes et de densité pour les légumineuses correspond à un indice de surface foliaire (LAI) qui intercepte au moins 95% du rayonnement actif du point de vue de la photosynthèse au début de la phase de remplissage des graines.



Madame Gertrude Pongi Khonde est détentrice d'un diplôme d'études approfondies en Sciences Agronomiques (2008) spécifiquement en filière semencière en sécurité alimentaire avec une base d'Ingénieur Agronome Zootechnicien obtenus à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa. Elle a suivi différentes formations dans les domaines de l'Agronomie des cultures à graines comme le maïs et quelques légumineuses afin d'accéder dans le cadre de recherche scientifique au grade d'attaché de recherche à l'Institut National pour l'Etude et la Recherche Agronomiques (INERA), au sein du Programme National Maïs (PNM). Elle est actuellement chercheur au Centre de Recherche de l'INERA Mvuazi dans la Province du Kongo Central en République Démocratique du Congo.