

Analyse biologique, nutritionnelle et économique de l'association maïs-haricot

Salvator Kaboneka*¹, Népomucène Ntukamazina², Spéciose Gacoreke³, Nestor Butoki¹

¹ Département Sciences et Technologies de l'Environnement (STE). Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. Bujumbura. Burundi.

² Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU). B.P. 795. Bujumbura, Burundi.

³ Département des Sciences et Productions Végétales (SPV). Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI). B.P. 2940. Bujumbura. Burundi.

* Auteur pour correspondance. Email: salvator.kaboneka@ub.edu.bi

Reçu: le 10 Août 2020

Accepté pour publication: le 03 Novembre 2020

Publié en ligne pour la première fois: le 18 Novembre 2020

Résumé

L'association maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) est omniprésente dans le système agraire Burundais. L'objectif global de cette investigation menée au Centre Semencier de Ruzibazi, commune Mukike, Province Bujumbura était d'évaluer les avantages biologiques, nutritionnels et économiques de l'association maïs-haricot par rapport aux monocultures correspondantes. Cinq traitements étaient testés: T₁ : Maïs 100 % - Haricot 0 % (4:0) ; T₂ : Maïs 75 % - Haricot 25% (3:1) ; T₃ : Maïs 50 % - Haricot 50 % (1:1) ; T₄ : Maïs 25 % - Haricot 75 % (1:3) et T₅ : Maïs 0 % - Haricot 100 % (0:4). Des traitements évalués, les résultats de l'étude révèlent que T₄ était caractérisé par de plus grandes efficacités biologiques et les gains les plus élevés en protéines. Cependant, il était surpassé par T₁ et T₂ en production d'énergie, alors que ni les différentes associations maïs-haricot, ni les monocultures correspondantes n'étaient économiquement rentables. De cette étude sur l'association maïs-haricot, qui constitue un exemple typique de l'agriculture de subsistance au Burundi, nous concluons que, en fin de compte, l'obtention et la garantie d'un régime alimentaire équilibré et régulier pour le ménage est, pour l'agriculteur Burundais, plus important que les autres bénéfices potentiels inhérents à ce système cultural.

Mots clés: Maïs, haricot, association, efficacité biologique, énergie, protéines, rentabilité

Abstract

Maize (*Zea mays* L.) - bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping system is widespread and omnipresent in Burundi agrarian system. The global objective of this investigation conducted in the Ruzibazi Seed Center, Mukike Commune, Bujumbura province was to evaluate the comparative biological, nutritional and economic advantages of the maize-bean intercropping system, relative to corresponding monocultures. Five treatments were: T₁ : Maize 100 % - Bean 0 % (4:0) ; T₂ : Maize 75 % - Bean 25% (3:1) ; T₃ : Maize 50 % - Bean 50 % (1:1) ; T₄ : Maize 25 % - Bean 75 % (1:3) and T₅ : Maize 0 % - Bean 100 % (0:4). The study revealed that T₄ treatment resulted in significantly greater biological land-use efficiency and produced the highest gains in proteins, but ranked third in energy production after T₁ and T₂. On the other hand, it appeared that neither maize and bean monocultures nor their intercrops are economically profitable. From our study on maize-bean intercropping, a typical example of subsistence agriculture in Burundi, we derive that obtaining and guaranteeing a well-balanced and regular diet for the household is more meaningful than any other intercropping benefits for the farmer.

Keywords: Maize, bean, intercropping, biological efficiency, energy, proteins, profitability

1. Introduction

La majorité des petits exploitants des pays en développement pratiquent la culture associée pour produire les aliments nécessaires aux besoins de leurs familles et pour éventuellement vendre le surplus (H. Cochet, 2004). Les associations les plus répandues sont celles combinant une composante légumineuse et une composante non-légumineuse, le plus souvent une céréale (K.E. Giller & al. 1991 ; L.B. Morgado & R.W. Willey, 2008 ; H. Zheng & al. 2017).

Au Burundi, dans une étude menée dans la région naturelle du Buyenzi par D.W. Bergen (1991), le maïs (*Zea mays* L.) et le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) seuls ou avec d'autres cultures apparaissaient dans 61,1 % des associations culturales enregistrées dans les petites exploitations en saison A. En saison B, cette proportion chute à 10 %, étant entendu que le maïs est principalement une culture de la première saison culturale A (ISTEEBU, 2015 ; ISTEEBU, 2018).

Selon une récente enquête agricole, le manioc (*Manihot esculenta* Crantz), le maïs (*Zea mays* L.) et le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) constituent les trois piliers de la sécurité alimentaire et nutritionnelle des ménages au Burundi (ISTEEBU, 2018). La plupart des champs cultivés au Burundi comportent au même moment plusieurs cultures associées, où près de la moitié des parcelles sont occupées par des associations de deux ou trois cultures, dans lesquelles le maïs se retrouve dans 42,7% des associations de deux cultures et dans 69,1% des associations de trois cultures (ISTEEBU, 2018).

Deux études menées par la Faculté d'Agronomie et de Bio-Ingénierie (FABI) dans les communes Mabanda et Vugizo de la province Makamba sur financement de l'ONG ZOA ont montré l'importance croissante des associations de cultures au sein des systèmes culturaux du Burundi (D. Kabura & P. Manirambona, 2016 ; I. Harumukiza & T. Ndamuhawenayo, 2016). Ces études-enquêtes avancent que seulement 16 % des cultures à Mabanda et 24 % à Vugizo sont en pur. Le reste étant en association de deux ou plusieurs cultures saisonnières, annuelles (manioc-*Manihot esculenta* Crantz) ou pérennes (bananier-*Musa* sp), dans lesquelles l'association maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* sp) est pratiquée dans 48 % des exploitations enquêtées.

Le maïs (*Zea mays* L.) et le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) constituent les principales cultures de subsistance qui contribuent à l'amélioration de la fertilité des sols par fixation de N₂ à travers la composante haricot, la sécurité alimentaire et nutritionnelle, l'intensification écologique de l'agriculture et l'adaptation aux changements climatiques (S.R. Mousavi & H. Eskandari, 2011 ; R.L. Rusinamhodzi & al., 2012 ; C. Carraca & al., 2015 ; H. Zhang & al., 2017 ; R. Sibomana & al., 2020).

C'est un fait que les cultures associées constituent une réponse aux contraintes inhérentes à l'augmentation des populations rurales qui doivent invariablement se nourrir (H. Cochet, 2004 ; R. Sibomana & al. 2020). Dans ce contexte, il s'avère impérieux de pouvoir quantifier et évaluer les productions des cultures associées par rapport aux monocultures et établir les pratiques les plus recommandables aux agriculteurs.

Même si les chercheurs et développeurs sont d'accord sur ce principe de quantitativement comparer les associations de cultures et les monocultures (D.W. Bergen, 1991 ; H. Cochet, 2004 ; H. Knörzer & al. 2009 ; R. Sibomana & al. 2020), il se pose, cependant, un certain nombre de problèmes qui sont essentiellement de deux ordres. Le problème le plus délicat est la difficulté d'évaluer la production des cultures très différentes sur une base comparable. D'autre part, il se pose un sérieux problème d'interprétation des résultats par manque d'indicateurs adéquats (C.K. Kiebsch & R.E. McCollum, 1987).

L'objet de la présente expérimentation était d'évaluer et comparer les différentes combinaisons maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et proposer la meilleure association entre les deux cultures sur base des indicateurs biologiques, nutritionnels et économiques.

2. Matériels et méthodes

2.1. Caractéristiques du site d'expérimentation

L'expérimentation testant l'association culturale maïs-haricot a été menée au Centre Semencier de Ruzibazi, en commune Mukike, province Bujumbura. La zone d'étude se situe dans la région naturelle du Mugamba (Sud) à une altitude de 2548 m. La végétation naturelle est caractérisée par la prépondérance des parcours à *Eragrostis olivacea* K. Schum souvent clairsemée de *Kotshya africana* Endl..

Les sols caractéristiques du Centre Semencier de Ruzibazi appartiennent aux ferralsols argileux apparentés aux sols issus du complexe schisto-quartzitique (G. Sottiaux & al., 1988). Les analyses de sol ont été effectuées suivant les procédures en vigueur au laboratoire de l'ISABU (C. Kibiriti & al., 1986). Les résultats de ces analyses sur les échantillons de sols collectés avant l'installation de l'expérimentation sont indiqués dans le tableau 1.

2.2. Matériels de plantation

La variété de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) utilisée était la variété naine MORE 88002 dite Akaryoshe, normalement plus adaptée aux zones situées entre 770 et 1850 m d'altitude, avec un rendement potentiel de 1200 kg/ha en station, 800 kg/ha en milieu rural et un cycle végétatif de 90 jours (ISABU, 2018). La variété de maïs (*Zea mays* L.) testée était la variété ZM 605, tolérante à la maladie des bandes et dont le

rendement potentiel est de 3,5 à 4,5 T/ha pour un cycle végétatif de 160 jours (ISABU, 2018). Les semences des deux variétés ont été obtenues auprès du Programme Semences de l'Institut des Sciences Agronomiques du Burundi (ISABU).

2.3. Mise en place de l'expérimentation

La fumure organique appliquée était constituée de bouse de vache mélangée à des débris végétaux bien décomposés issus de l'étable du Centre Semencier de Ruzibazi. La fumure inorganique appliquée répondait à la formule N-P₂O₅-K₂O 45-60-30 recommandée pour la culture de maïs et 18-46-0 recommandée pour celle du haricot (MINEAGRIE, 2016).

Les écartements adoptés et recommandés par les services de recherche et de vulgarisation étaient de 20 cm dans les lignes et 40 cm entre les lignes pour le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), 40 cm dans les lignes et 80 cm entre les lignes pour le maïs (*Zea mays* L.). Les travaux de terrain ont concerné le labour, le piquetage, les semis simultanés de maïs et de haricot suivis de deux sarclages à trois et six semaines du semi (MINEAGRIE, 2016).

2.4. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé était le dispositif en blocs complets randomisés avec 4 répétitions. La parcelle élémentaire était répartie sur un espace de 4,4 m x 2 m avec une bordure de 80 cm. Une voie de passage de 1 m a été prévue entre les blocs. Le type d'association adoptée était l'association en lignes de maïs (*Zea mays* L.) et de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dont les proportions sont indiquées entre parenthèses dans les 5 traitements décrits ci-après.

T₁ : Maïs 100 % - Haricot 0 % (4:0)

T₂ : Maïs 75 % - Haricot 25% (3:1)

T₃ : Maïs 50 % - Haricot 50 % (1:1)

T₄ : Maïs 25 % - Haricot 75 % (1:3)

T₅ : Maïs 0 % - Haricot 100 % (0:4)

Les traitements T₁ et T₅ correspondent aux monocultures de maïs et de haricot, respectivement.

2.5. Analyse Statistique

Les résultats de rendements obtenus ont été soumis à une analyse de la variance à l'aide du logiciel Genstat (W.R. Buisse & al., 2004) complétées par le test de Newman-Keuls pour dégager les groupes de moyennes homogènes au seuil de 5 % (P. Dagnélie, 1987). Un test de Fisher associé au niveau

de signification sont également indiqués dans les tableaux analytiques 2 à 5.

2.6. Indices biologiques, nutritionnels et économiques

Plusieurs indicateurs ont été utilisés pour évaluer les associations des plantes (B.T.S. Doubi & al, 2016). Les plus courants sont : Land Equivalent Ratio (LER), Area x Time Equivalent Ratio (ATER) et leur combinaison Land Equivalent Competition (LEC). Conscient du principe « que traduire est trahir », nous avons jugé bon de garder et utiliser les sigles en anglais correspondants aux indices biologiques.

En complément à ces indicateurs biologiques s'ajoutent les valeurs nutritives et monétaires comparées entre les systèmes en association et leurs monocultures correspondantes (R. Sibomana & al., 2020).

Land Equivalent Ratio (LER)

Ce concept a été avancé par Harwood et Rice à l'Institut International de Recherche sur le Riz (IRRI) entre 1974 et 1975 (R.R. Harwood & E.C Rice, 1975). L'indice LER permet de porter un jugement objectif et quantifié sur l'intérêt d'une association de cultures par rapport aux cultures pures. Il répond fondamentalement à la question suivante : combien d'unités de terre sont requises pour produire la même quantité de chaque culture associée produite par unité de surface en monoculture?

LER est mathématiquement défini de manière suivante :

$$LER = LER_{\text{maïs}} + LER_{\text{haricot}} = (R_{\text{ma}}/R_{\text{mm}}) + (R_{\text{ha}}/R_{\text{hm}}) \quad (1)$$

où

R_{ma} est le rendement du maïs (m) en association (a),

R_{mm} est le rendement du maïs en monoculture (m),

R_{ha} est le rendement du haricot (h) en association (a)

R_{hm} est le rendement du haricot en monoculture (m).

LER est un indicateur de l'efficience biologique de l'association dans l'utilisation de la terre en comparaison de la monoculture. Des valeurs de LER > 1 indiquent que l'association favorise la croissance et le rendement des espèces associées. Au contraire, LER < 1 signifie que l'association n'a pas d'avantage sur les monocultures et que la compétition interspécifique enfreint à l'interaction interspécifique au sein du système en association (G. Zhang & al., 2011).

Ce paramètre est néanmoins associé à quelques limitations. Il est inadéquat pour des associations de cultures de différents cycles (durées). Il ne prévoit pas que la culture avec la plus courte période de croissance peut être replantée, ou que la terre libérée peut encore être exploitée par une autre culture. En conséquence, le LER surestime l'efficience biologique des associations de cultures. Tout compte fait, le

concept de LER donne de bonnes estimations de l'efficacité biologique seulement dans deux conditions : (i) quand les composantes associées ont les mêmes durées de production ; (ii) quand les dates de plantation et de récolte des cultures associées coïncident avec celles des monocultures correspondantes. Ces deux conditions sont rarement simultanément remplies (C.K. Hiebisch & R.E. McCollun, 1987).

Land Equivalent Competition (LEC)

Au concept de LER est souvent associé celui de LEC (Land Equivalent Competition) qui est le produit des LER associés au maïs et au haricot. Ce paramètre d'efficacité biologique des associations est défini par la relation ci-après : (LEC)

$$LEC = LER_{\text{maïs}} \times LER_{\text{haricot}} \quad (2)$$

Sur cette base, une association de cultures est dite avantageuse lorsque $LEC > 0,25$ (P.O. Adetiloye & al., 1983).

Area x Time Equivalent ratio (ATER)

Les systèmes de cultures associées impliquent une intensification à la fois dans l'espace et dans le temps. La production agricole n'est pas uniquement une fonction de la surface, des pratiques culturales et de l'environnement comme le suggère l'indice LER. Elle est aussi liée à la durée de la croissance d'une espèce, ou le temps durant lequel la terre est occupée par chaque culture (C.K. Hiebisch & R.E. McCollun, 1987).

Le concept ATER répond aux conditions suivantes : (i) tout système cultural nécessite des investissements en temps et en terre ; (ii) par conséquent, la production par unité de surface et de temps devrait être le critère ultime de comparaison des productions des différents systèmes culturaux ; (iii) LER ne tient pas compte du fait que le système cultural A peut nécessiter plus d'investissement en temps qu'un système cultural B.

Ainsi, le concept ATER est supposé résoudre l'inadéquation liée à l'interprétation de LER, dans la mesure où il tient compte du facteur temps. Dans les nombreux cas où il existe des différences de temps de plantations et de récolte, ATER est meilleur puisque la surface x temps non utilisée n'est pas considérée dans l'analyse. A cet égard, certains chercheurs estiment même que la production par jour en lieu et place de production par unité de surface devrait être le critère d'évaluation des productions dans les pays en développement comme le Burundi (C.K. Hiebisch et R.E. McCollun, 1987 ; C.K. Hiebisch & al., 1995).

ATER est calculé de la façon suivante:

$$ATER = ATER_{\text{maïs}} + ATER_{\text{haricot}} \quad (3)$$

$$ATER_{\text{maïs}} = (R_{\text{ma}}/R_{\text{mm}}) \times (T_{\text{maïs}}/T_{\text{association}}) \quad (4)$$

$$ATER_{\text{haricot}} = (R_{\text{ha}}/R_{\text{hm}}) \times (T_{\text{haricot}}/T_{\text{association}}) \quad (5)$$

où

$T_{\text{maïs}}$ est la durée du cycle de croissance du maïs (jour)

T_{haricot} est la durée du cycle de croissance du haricot (jour)

$T_{\text{association}}$ est la durée en jours de l'espèce avec la plus longue durée de croissance (jour).

$ATER > 1$: plus de surface x temps est nécessaire pour la monoculture par rapport à l'association. C'est un avantage pour l'association.

$ATER = 1$: Association et monoculture sont équivalentes en terme de surface x temps utilisés.

$ATER < 1$: moins de surface x temps est nécessaire pour la monoculture par rapport à l'association. L'association est moins avantageuse.

Il est à noter que lorsque $T_{\text{maïs}} = T_{\text{haricot}} = T_{\text{association}}$, les indices LER et ATER s'équivalent ($ATER = LER$).

Agressivité

L'agressivité A ou indice de compétition est une mesure de la supériorité de rendements entre deux cultures en association. La notion a été introduite par C.A. McGilchrist (1965) et utilisée entre autres par B.T.S Doubi & al. (2016). Pour le maïs et le haricot en association, l'indice d'agressivité (A) est exprimé de la façon suivante:

$$A_{\text{maïs}} = [(R_{\text{ma}}/(R_{\text{mm}} \times P_{\text{ma}})) - [(R_{\text{ha}}/(R_{\text{hm}} \times P_{\text{ha}}))] \quad (6a)$$

$$A_{\text{haricot}} = [(R_{\text{ha}}/(R_{\text{hm}} \times P_{\text{ha}})) - [(R_{\text{ma}}/(R_{\text{mm}} \times P_{\text{ma}}))] \quad (6b)$$

où

R_{ma} = Rendement du maïs en association ;

R_{ha} = Rendement du haricot en association ;

R_{mm} = Rendement du maïs en monoculture ;

R_{hm} = Rendement du haricot en monoculture ;

P_{ma} = Proportion du maïs dans l'association maïs-haricot ;

P_{ha} = Proportion de haricot dans l'association maïs-haricot.

Valeurs nutritives

L'une des approches d'évaluation des cultures associées est leur valeur nutritive comparée à celle de la monoculture. Cette évaluation est valable pour les cultures vivrières. Le but est de produire des aliments pouvant contenir un mélange équilibré en énergie, protéines, acides aminés essentiels, vitamines et minéraux (R. Sibomana et al., 2020).

Les contenus en énergie et en protéines des monocultures et des cultures en association ont été calculés sur base des normes FAO (FAO, 2005). Les contenus protéiniques par 100 g de produit sont de 22,6 g pour le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et 9,3 g pour le maïs (*Zea mays* L.), respectivement. La

même quantité (100 g) du produit fournit 333 kilocalories pour le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et 353 kilocalories pour la farine de maïs (*Zea mays* L.) (FAO, 2005). Les valeurs en énergie et en protéines ont été calculées à l'aide des équations 7 et 8.

$$\text{Energie (kcal/ha)} = (R_h \times E_h) + (R_m \times E_m) \quad (7)$$

$$\text{Protéine totale (kg/ha)} = (R_b \times P_b) + (R_m \times P_m) \quad (8)$$

où

R=Rendement (kg/ha) du haricot (h) et maïs (m);

E_i et P_i = Contenus en énergie et protéines pour les cultures respectives.

Valeur monétaire et efficacité économique

Lorsqu'on compare les différents systèmes de cultures associées, l'on tire plusieurs avantages de l'évaluation économique des différences de production entre l'association et les monocultures. Les avantages les plus importants sont : (i) il est possible d'ajouter les différentes productions agricoles et les différents intrants en utilisant une unité de mesure commune ; (ii) les différences de qualité sont prises en considération ; (iii) les chercheurs peuvent évaluer les différents systèmes sur la même base que l'agriculteur.

La valeur monétaire, le bénéfice et la performance économique sont estimées par les équations 9, 10 et 11.

$$\text{Valeur monétaire} = (R_m \times \text{Prix maïs}) + (R_h \times \text{Prix haricot}) \quad (9)$$

$$\text{Bénéfice} = \text{Valeur monétaire} - \text{coûts variables des associations et des monocultures} \quad (10)$$

$$\text{Performance économique} = V/C \quad (11)$$

où

V = Valeur monétaire et C = Coût total.

Tout investissement est considéré rentable/profitable lorsque son rapport valeur (V) sur coût (C), V/C > 2 (W.Y. Young, 1989).

L'évaluation économique admettra que l'agriculteur effectue son choix parmi les possibilités de systèmes de cultures sur la base du revenu net le plus élevé, c'est-à-dire la valeur de la production agricole diminuée de son prix de revient. Cette même évaluation économique des cultures associées est confrontée à quelques limitations. Il est admis que les associations culturales sont le prototype d'une agriculture de subsistance, un modèle agricole qui ne suit pas forcément les prix du marché. En plus, les prix changent avec le temps de l'année et les régions, ce qui constitue un

problème de comparaison transversale (R. Sibomana & al., 2010).

Avantages monétaires

Deux autres modèles économiques (AM_{LER} et AM_{ATER}) affiliés aux deux principaux indices biologiques que sont le LER et l'ATER sont parfois utilisés. Plus applicables aux cultures à orientation essentiellement commerciale, ils ont été proposés par I. Yakuza (2011) et sont décrits par les équations 12 et 13 ci-après.

$$AM_{LER} = [VTA \times \frac{(LER-1)}{LER}] \quad (12)$$

où

AM = Avantage Monétaire

VTA = Valeur monétaire totale de l'association

LER = Land Equivalent Ratio

Du fait que l'indice ATER est considéré plus objectif que LER, l'équation 12 est ajustée en utilisant le paramètre ATER à la place de LER.

$$AM_{ATER} = [VTA \times \frac{(ATER-1)}{ATER}] \quad (13)$$

L'interprétation des équations 12 et 13 diffère, dans la mesure où AM_{LER} exprime l'accroissement de la valeur monétaire de l'association par unité de surface, alors que AM_{ATER} exprime cet accroissement par unité de surface x temps (I. Yakuza, 2011).

3. Présentation et discussion des résultats

3.1 Caractéristiques physico-chimiques du sol de Ruzibazi

Les caractéristiques physico-chimiques du sol ayant fait l'objet de l'étude sont détaillées dans le tableau 1. Le sol utilisé dans l'étude était de texture argileuse, riche en matière organique avec un pH acide (pH < 5,5) et des risques de toxicité aluminique. Les sols de cette région sont considérés comme de moyenne à faible fertilité ((E. Tessens & J. Gourdin, 1993).

3.2 Rendements

Le tableau 2 montre les rendements du maïs et du haricot en cultures pures et en différentes proportions d'associations. Dans les deux cas, les rendements des cultures de maïs (*Zea mays* L.) et de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) sont significativement supérieurs aux rendements enregistrés quand les deux cultures sont en association.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol de Ruzibazi.

Paramètre	Valeur
pH _{eau}	4,7
% C	5,60
% N	0,61
C/N	9,18
CEC (cmol _c /kg)	16,3
Al ³⁺ échangeable (cmol _c /kg)	4,91
% Al échangeable	30
H ⁺ échangeable (cmole _c /kg)	0,55
Argile (%)	64,87
Limon (%)	13,18
Sable (%)	21,95

Dans le cas du maïs (*Zea mays* L.), l'analyse de la variance ne montre pas de différence significative entre les traitements T₂, T₃ et T₄. Tous les trois traitements appartiennent au même groupe homogène (b), dans l'ordre de grandeur suivant : T₂ ≥ T₄ ≥ T₃. La situation de la culture de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) est plus nette. La différence de rendements entre les traitements T₂, T₃ et T₄ est tranchée. Ils suivent l'ordre décroissant suivant : T₄ >> T₃ >> T₂.

Tableau 2. Rendements (kg/ha) des cultures en associations et monocultures.

Traitement	Maïs	Haricot
T ₁ : Maïs 100 % - Haricot 0 %	5187±374a	-
T ₂ : Maïs 75 % - Haricot 25%	3674±1464b	348±127d
T ₃ : Maïs 50 % - Haricot 50 %	3174±1366b	628±200c
T ₄ : Maïs 25 % - Haricot 75%	3324±1266b	1020±325b
T ₅ : Maïs 0 % - Haricot 100 %	-	1327±421a
Moyenne générale	3839	831
ppds	591	127
Niveau de signification	***	***

Les moyennes (avec écart-types) suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.
*** = Très hautement significatif (p < 0,001).

Par rapport à la monoculture de maïs (*Zea mays* L.), les chutes de rendement étaient de 29 % pour le traitement T₂, 39 % pour le traitement T₃ et 36 % pour le traitement T₄. Parallèlement, les chutes de rendement du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dues à son association avec le maïs (*Zea mays* L.) sont faibles pour le traitement T₄ (23 %) mais plus élevées pour les traitements T₃ (53 %) et T₂ (74 %), à faibles densités de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans l'association. Sur base de ces observations, on peut conclure que le traitement T₄ (25 % maïs + 75 % haricot) est le plus adapté à l'association maïs

(*Zea mays* L.) - haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) par rapport aux deux autres traitements T₂ et T₃.

3.3. Indices biologiques (LER, ATER, LEC, A)

Le tableau 3 indique les variabilités des indices biologiques (LER, ATER et LEC) en fonction des niveaux ou proportions d'associations maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Dans les trois cas (LER, ATER et LEC), le traitement T₄ (Maïs 25 % - Haricot 75 %) est significativement supérieur aux traitements T₃ (Maïs 50 % - Haricot 50 % et T₂ (Maïs 75 % - Haricot 25%) qui sont statistiquement équivalents. Autrement dit, des trois niveaux d'associations maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), la combinaison 1:3 est la plus biologiquement avantageuse sur base des indicateurs biologiques LER, ATER et LEC.

Rappelons que les valeurs de LER>1 indiquent que l'association favorise la croissance et le rendement des espèces associées. Au contraire, LER<1 signifie que l'association n'a pas d'avantage sur les monocultures (C.K. Kiebsch & R.E. McCollum, 1987; C.K. Kiebsch & al., 1995 ; G. Zhang & al., 2011).

En application de ces deux principes pour le cas de notre étude, le traitement T₄ avec une valeur de LER=1,42 implique que l'association dans la proportion 1:3 maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) est de 42 % plus avantageuse que le maïs et le haricot en monoculture. Cet avantage tombe à seulement 10 % pour l'association 50 % maïs-50 % haricot (T₃) et devient négatif pour le traitement 75 % maïs-25 % haricot (3:1). Pour ce dernier traitement T₂, l'association maïs-haricot est nettement moins avantageuse que les monocultures correspondantes.

L'analyse du paramètre LEC qui est le produit des indices LER_{maïs} et LER_{haricot} aboutit aux mêmes conclusions. Avec un indice LEC largement supérieur à 0,25 (double), le traitement T₄ (1:3 maïs-haricot) est le plus avantageux des trois types d'associations maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) testés.

D'autre part, il apparaît que l'indice ATER est soit égal à 1 (T₄) ou inférieur à 1 (T₃ et T₂). Autrement dit, pour la combinaison 1:3 (T₄), association et monoculture sont équivalents en terme de surface x temps utilisés. De l'autre côté, plus pour le traitement T₂ que T₃, moins de surface x temps est nécessaire pour la monoculture par rapport à l'association. Les deux types d'associations maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) sont donc moins avantageux par rapport aux monocultures correspondantes. Un aperçu d'études similaires à la nôtre sur l'efficacité biologique de l'association maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) indique des valeurs de LER comparables à la valeur observée pour le traitement T₄.

Tableau 3. LER, ATER et LEC pour les différents niveaux d'associations maïs-haricot.

Traitement	LER	ATER	LEC
T ₂	0,93±0,09b	0,82±0,07b	0,17±0,04b
T ₃	1,10±0,30b	0,86±0,24b	0,30±0,09b
T ₄	1,42±0,38a	1,02±0,27a	0,50±0,16a
Moy.générale	1,15	0,90	0,32
ppds	0,19	0,14	0,12
Niveau de signif.	**	*	**

Les moyennes (avec écart-types) suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

* = Simplement significatif (p<0,05).

** = Hautement significatif (p < 0,01).

C'est ainsi que C. Francis (1989) aux Etats-Unis, V. Balasubramanian & L. Sekayange (1990) au Rwanda, L. Li & al. (1999) en Chine et E.K. Nassary & al. (2020) en Tanzanie ont rapporté des valeurs de LER variant de 1,38 à 1,55. Ils ont en même temps avancé que ces valeurs peuvent être influencées par le timing des semis, lesquels peuvent soit être faits en même temps, à la mi-saison de la culture du maïs ou à la fin de la maturité de celle-ci. Dans ce dernier cas de figure, les tiges de maïs (*Zea mays* L.) peuvent constituer les tuteurs pour le haricot volubile (*Phaseolus vulgaris* L.) diminuant de ce fait les coûts inhérents à son tuteurage. Cet arrangement spatio-temporaire est très fréquent dans les exploitations Burundaises (D.W. Bergen, 1991 ; H. Cochet, 2004 ; R. Sibomana & al., 2010).

Un certain nombre d'auteurs se sont intéressés aux effets des densités de plantation du maïs (*Zea mays* L.) et du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) associé et leurs niveaux de fertilisation N et P (L.B. Morgado & R.W. Willey, 2008). Dans ce cas précis, le maïs (*Zea mays* L.) était semé à des densités de 20000 et 40000 plants/ha, tandis que le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) l'était à trois densités : 30000, 60000 et 90000 plants/ha. Ces investigateurs ont rapporté que l'augmentation de la densité de plantation était suivie par celles des rendements et des profits. Cependant, l'augmentation de la densité du maïs (*Zea mays* L.) était concomitante à la réduction des rendements du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). La valeur la plus élevée de LER était observée avec la densité de 60000 plants/ha de maïs (*Zea mays* L.) correspondant à une ligne de maïs combinée avec 3 lignes de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.). Cet arrangement spatial équivaut au meilleur traitement (T₄) observé dans notre expérimentation.

Une expérimentation menée au Nord-Ouest de l'Ethiopie (A.T. Alemayehu & al., 2017) sur l'association maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) a montré que le semis ligne par ligne donne de meilleurs avantages et de LER (=1,2), en comparaison avec le semis de lignes jumelées de

haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) entre lignes de de maïs (*Zea mays* L.).

Dans le même ordre d'idée, dans une étude comparable à la nôtre, Ashenafi (2016) a évalué les indices biologiques du maïs (*Zea mays* L.) en monoculture (100 %) en association avec le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) à différentes densités (0%, 25 %, 50 %, 75 % et 100 %). Ces auteurs ont observé des valeurs de LER aussi élevées que 1,4 et une augmentation des productions totales. Ils ont aussi relevé d'assez faibles réductions de production de maïs (*Zea mays* L.) en association par rapport à la monoculture (- 13,4 %).

Les résultats de l'analyse de l'agressivité (A) associée aux différents niveaux d'associations maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) sont consignés dans le tableau 4. Celui-ci indique que le maïs (*Zea mays* L.) est plus agressif que le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), particulièrement dans le traitement T₄ (1:3).

En effet, un coefficient d'agressivité A d'une culture donnée en association supérieur à zéro indique que cette culture spécifique est plus dominante. Dans le cas contraire, l'autre culture en association est plus dominante (B.T.S Doubi & al., 2016).

La différence entre les indices d'agressivité A_{maïs} et A_{haricot} est aussi utilisée pour évaluer les associations de deux cultures, à l'exemple du maïs (*Zea mays* L.) et le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans notre cas. Si la différence A_{maïs}-A_{haricot} est élevée et est supérieure à zéro, alors le maïs est plus dominant que le haricot (B.T.S Doubi & al., 2016). Dans le cas contraire, c'est le haricot qui est le plus dominant. Les valeurs les plus élevées de A_{maïs} et de la différence A_{maïs}-A_{haricot} sont observées pour le traitement T₄.

Tableau 4. Indices d'agressivité (A) pour les différents niveaux d'associations maïs-haricot.

Traitement	A _{maïs} (1)	A _{haricot} (2)	(1-2)
T ₂	0,95±0,10b	1,03±0,07a	-0,08±0,05b
T ₃	1,23±0,34b	0,93±0,29a	0,30±0,21b
T ₄	2,59±0,85a	0,34±0,36b	2,25±1,04a
Moy.générale	1,59	0,77	0,82
ppds	0,34	0,20	0,41
Niv.de signif.	***	***	***

Les moyennes (avec écart-types) suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

*** = Très hautement significatif (p < 0,001).

3.4. Valeurs nutritives

Les résultats d'analyse de la variance effectuée sur les valeurs de l'énergie (kcal/ha) et des protéines (kg/ha) sont indiqués dans le tableau 5.

La valeur énergétique correspondant au traitement T₁ (100% maïs) est significativement supérieure aux valeurs associées aux autres traitements, plus particulièrement le

traitement T₅ (100 % haricot). Le classement des 5 traitements testés suit l'ordre suivant : T₁ > T₂ ≥ T₄ ≥ T₃ >> T₅. Il faut noter que, quand bien même les traitements T₃ (50 % maïs-50 % haricot) et T₄ (25 % maïs-75 % haricot) sont statistiquement équivalents, ce dernier traitement produit en valeur absolue légèrement plus d'énergie que le traitement T₃.

S'agissant des contenus en protéines associées aux traitements évalués dans la présente étude, il ressort du tableau 5 que le traitement T₄ (25 % maïs-75 % haricot) est significativement supérieur aux 4 autres traitements suivant l'ordre décroissant ci-après: T₄ > T₁ ≥ T₃ ≥ T₂ > T₅.

Tableau 5. Contenus en énergie et en protéines pour les différents systèmes culturaux maïs-haricot.

Traitement	Energie (kcal/ha)	Protéines (kg/ha)
T ₁	1464809±105731a	477,2±35,4b
T ₂	1037492±415075b	406,9±131,9c
T ₃	925915±380585b	446,0±137,9bc
T ₄	939870±354178b	539,5±139,4a
T ₅	440±19c	300,29±13,5d
Moyenne générale	3839	831
ppds	591	127
Niveau de signif.	***	***

Les moyennes (avec écart-types) suivies d'une même lettre dans une même colonne ne sont pas significativement différentes au seuil de 5 %.

*** = très hautement significatif (p < 0,001).

3.5. Efficience économique

L'analyse de l'efficience économique des systèmes culturaux maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) testés (Tableau 6) basée sur les bénéfices engendrés et le rapport V/C indique qu'aucun des 5 systèmes n'est économiquement rentable au regard des normes de la FAO (W.Y. Young, 1989).

Tableau 6. Efficience économique (Fbu) des différents systèmes culturaux maïs-haricot.

Traitement	Coûts	Valeurs	Bénéfices	V/C
T ₁	453127	782386	329259	1,73
T ₂	645195	664444	19249	1,03
T ₃	779591	694511	-85080	0,89
T ₄	939116	804825	-134291	0,86
T ₅	1040140	464352	-575788	0,45

Le traitement T₁ correspondant à la monoculture de maïs (*Zea mays* L.) est le seul système cultural relativement rentable avec des bénéfices monétaires évalués à plus de 300000 Fbu et un rapport V/C=1,73. Tous les autres systèmes (T₂, T₃, T₄, T₅) présentent des valeurs V/C inférieures ou tout

au plus égal à 1, et des bénéfiques insignifiants (T₂) et même négatifs (T₃, T₄ et T₅).

En fin de compte, notre étude fait ressortir que, ni la monoculture de maïs (*Zea mays* L.), ni ses différentes associations avec le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) et encore moins la monoculture de haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) ne sont rentables.

L'application des équations 12 et 13 donne les valeurs des avantages monétaires (AM_{LER} et AM_{ATER}) associées aux trois systèmes d'associations maïs-haricot (Tableau 7). Ces valeurs suivent l'ordre décroissant suivant : T₄ > T₃ > T₂, similaires aux tendances suivies par les indices biologiques LER et ATER, desquels elles émanent, conformément aux équations 12 et 13. Partant, les avantages monétaires les plus élevés sont obtenus avec le traitement T₄ (25 % maïs-75 % haricot).

Tableau 7. Evaluation de l'avantage monétaire (AM) des différents niveaux d'associations maïs-haricot.

Traitement	AM _{LER}	AM _{ATER}
T ₂ :Maïs 75 % - Haricot 25%	-50012	-145853
T ₃ :Maïs 50 % - Haricot 50 %	63137	-113060
T ₄ : Maïs 25 %-Haricot 75%	238047	15781

Dans une récente étude sur la triple association manioc (*Manihot esculenta* Crantz)-maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), R. Sibomana & al. (2020) ont relevé la non-rentabilité des systèmes culturaux testés. Ces auteurs ont avancé l'hypothèse que l'agriculture de subsistance, largement pratiquée et omniprésente dans le paysage agricole Burundais, est peu économiquement rentable, en raison des faibles prix offerts aux producteurs agricoles, par ce qu'ils n'ont aucun contrôle sur le marché. Ajouter à cela que la majorité des agriculteurs ont un accès limité aux infrastructures de stockage qui devraient leur permettre de contourner les risques élevés d'écouler à vils prix leurs productions sur le marché aussitôt après les récoltes. Dans ce contexte, s'il s'avère que l'agriculture de subsistance et les associations de cultures ne sont pas rentables au sens économique du terme, pourquoi alors ces systèmes sont-ils si largement pratiqués par les agriculteurs Burundais et ce de génération en génération ? Cette même question, d'autres investigateurs se la sont posée (D.W. Bergen, 1991 ; H. Cochet, 2004 ; R. Sibomana & al., 2020).

Il transparaît que pour la majorité des agriculteurs, la rentabilisation des opérations agricoles au sens économique ne soit pas la première priorité. Au contraire, garantir une alimentation équilibrée à la famille tout en minimisant les risques de pertes de récolte consécutivement aux aléas abiotiques (climat) et biotiques (maladies) constituent l'aspiration et l'objectif primordial poursuivi par l'agriculteur Burundais (F.K. Ming & al., 2019 ; R. Sibomana & al., 2020). C'est par ailleurs la caractéristique typique de l'agriculture de subsistance (H.Cochet, 2004 ; A.S. Lithourgidis & al., 2011).

A.S. Lithourgidis & al. (2011) ont relevé à juste titre que les indices biologiques que sont le LER, ATER et leur terme dérivé LEC manquent de base physiologique et physique. En cela, ils sont en accord avec I. Yakuza (2011) qui suggère qu'une meilleure compréhension de l'association des cultures devrait être basée sur l'évaluation des paramètres physiologiques et physiques aussi variés que : (i) la radiation photo-synthétiquement active ; (ii) le niveau d'interception de la lumière, (iii) les efficacités d'utilisation de la lumière et de l'eau ; (iv) le taux de transpiration ; (v) l'accumulation thermique ; (vi) le taux d'absorption des éléments nutritifs ; (vi) les composantes de rendements, y compris les biomasses aériennes et racinaires et leurs rapports, ainsi que l'indice de récolte, mais également (vii) la dynamique des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol, sans exclure les aspects de séquestration du C et de transfert de l'azote issu de la fixation biologique par la légumineuse à la non-légumineuse associée (K.E. Giller & al., 1991 ; W.F. Cong & al., 2015 ; M. Latati & al., 2016 ; H. Zhang & al., 2017 ; M. Zaeem & al., 2019).

Cet aspect de transfert d'azote d'une légumineuse à la non-légumineuse associée a rencontré l'intérêt de nombreux investigateurs (H. Zhang & al., 2017 ; C. Carraca & al., 2015 ; K.E. Giller & al., 1991 ; B.E. Frankow-Lindberg & A.S. Dahlin, 2013). Ce processus biochimique constitue l'un des avantages de l'association maïs (*Zea mays* L.)-haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), qui favoriserait également la nutrition en P du maïs (*Zea mays* L.) en association par rapport à sa culture pure (M. Latati & al., 2016).

La recherche sur les associations culturales est pratiquement inexistante dans les institutions de recherche au Burundi, au moment où ces pratiques culturales sont omniprésentes dans les exploitations agricoles (D.W. Bergen, 1991 ; H. Cochet, 2004 ; ISTEEBU, 2015 ; ISTEEBU, 2018 ; R. Sibomana & al., 2020).

Cette inadéquation entre la recherche agronomique et la réalité du monde rural fait qu'une variété peut être sélectionnée et vulgarisée pour ses performances purement agronomiques et ne pas être acceptée par l'agriculteur. Tout simplement par ce qu'elle ne répond pas à ses critères de choix et d'adoption, lesquels vont le plus souvent au-delà de la productivité de la variété considérée. Le potentiel «d'associabilité» peut, dans bien des cas être le critère majeur d'adoption d'une variété en milieu rural (R. Sibomana & al., 2020).

Au regard de la complexité inhérente aux systèmes culturaux impliquant les associations céréales-légumineuses, à l'exemple du maïs (*Zea mays* L.) et du haricot (*Phaseolus vulgaris* L.), leur meilleure compréhension va indéniablement au-delà des compétences des seuls agronomes. Elle requiert logiquement le concours de plusieurs compétences allant de l'agronomie au sens large, à l'écologie, la physiologie végétale, l'entomologie et la phytopathologie, la sociologie

rurale, et bien entendu l'économie vue du côté de la rentabilité.

Nous devons reconnaître que réunir de telles compétences est un défi majeur de tout programme de recherche de tout pays, particulièrement pour le Burundi. Car la recherche sur les associations culturales reste complexe. Complexe au niveau de la sélection des variétés adaptées à l'association quant à leurs architectures aériennes (port) et racinaires (stratification). Egalement complexe au niveau du choix des densités optimales de semis des composantes en association autant qu'à celui des dates de semis des différentes composantes en association, ainsi qu'aux techniques et niveaux de fertilisation.

Dans tous les cas, on peut légitimement avancer que la recherche institutionnelle dans le domaine des associations culturales reste aujourd'hui un terrain très peu exploré au Burundi. Au moment où la pratique des associations culturales y est omniprésente et le restera, à moins que s'opère une mutation socio-économique majeure du système agricole du pays (R. Sibomana & al., 2020). Cette inadéquation entre la recherche spécifique aux associations culturales et la réalité du milieu rural devrait, de manière urgente, interpeller l'attention des gestionnaires du secteur agricole au Burundi.

4. Conclusion

C'est un fait que les cultures associées constituent une réponse et un mécanisme d'adaptation aux contraintes inhérentes à l'augmentation des populations rurales et à l'exiguïté consécutive des terres agricoles. Dans ce contexte, il s'avère impérieux de pouvoir quantifier et évaluer les productions des cultures associées en rapport avec les monocultures et établir les pratiques les plus recommandables à l'agriculteur. La présente expérimentation a évalué cinq traitements à base de maïs et de haricot. Les traitements testés étaient : T₁ : Maïs 100 % - Haricot 0 % (4:0) ; T₂ : Maïs 75 % - Haricot 25 % (3:1) ; T₃ : Maïs 50 % - Haricot 50 % (1:1) ; T₄ : Maïs 25 % - Haricot 75 % (1:3) et T₅ : Maïs 0 % - Haricot 100 % (0:4).

L'analyse des performances de ces différents traitements était basée sur les indicateurs biologiques (LER, ATER et LEC), nutritionnels (énergie et protéines) et économiques (valeur monétaire, bénéfice, V/C). Les résultats obtenus montrent que le traitement T₄ combinant le maïs (*Zea mays* L.) et le haricot (*Phaseolus vulgaris* L.) dans la proportion 1:3 est la plus biologiquement efficiente. Il produit également plus de protéines par rapport à tous les cinq traitements évalués, mais son apport énergétique est significativement inférieur au traitement T₁ (monoculture de maïs). D'autre part, aucun des systèmes culturaux testés n'est économiquement rentable. Une indication que, en fin de compte, la rentabilité économique des associations culturales n'est pas la première priorité de l'agriculteur. Son double objectif stratégique est plutôt la garantie d'une alimentation équilibrée et régulière du

ménage doublée de la minimisation des risques de pertes de récolte inhérents aux aléas abiotiques (climat) et biotiques (maladies).

Références

- [1] Adafre, A.N., 2016. Advantages of maize-haricot bean intercropping over sole cropping through competition indices at West Badewacho woreda, hadiya Zone, SNNPR. *Academia Research Journal of Agricultural Science and Research*. Vol. 4 (1): 1-8.
- [2] Adetiloye, P.O., F.O.C Ezedioma & P. Okigbo, 1983. A land coefficient concept for evaluation of competitive and productive interactions on simple complex mixtures. *Ecological Modelling* 19: 27-39. *Agrekon*. Volume 35 (4): 266-270.
- [3] Alemayehu, A. T. Tamado, D. Nigussie & D. Yigzaw, 2017. Maize-common bean intercropping to optimize maize-based crop production. *The Journal of Agriculture Science*. Volume 155 (7): 1124-1136.
- [4] Andrews, D.S. & A.H. Kassam. 1976. The importance of multiple cropping in increasing world food supplies. In: *Multiple cropping* (R.I. Papendick, P.A. Sanchez and G.B. Triplett, eds.). *Amer. Soc. Agron. Spec. Publ.* 27: 1-10.
- [5] Balasubramanian, V. & L. Sekayange. 1990. Area Harvests Equivalency ratio for measuring efficiency in multiseason intercropping. *Agron. J.* 82: 512-522.
- [6] Bergen, D.W. 1988. Etude socio-économique sur les cultures du haricot et du maïs dans le Buyenzi. Approche du système d'exploitation en commune Busiga. 237 p.
- [7] Buysse, W., R. Stern & R. Coe. 2004. *GenStat Discovery Edition for Everyday use*. ICRAF. Nairobi, Kenya. 114 p.
- [8] Carraca, C., M.O. Torres & M. Modeiro. 2015. Underestimated role of legume roots for soil N fertility. *Agronomy Sustainable Development*. 35: 1095-1102.
- [9] Cochet, H. 2004. Agrarian dynamics population growth and resource management: the case of Burundi. *Geojournal* 60: 111-122.
- [10] Cong, W-F., E.L.L. Hoffland, J. Six, J.H. Sun, X-G. Bao, F-S. Zhang & W.V. Der Werf. 2015. Intercropping enhances soil carbon and nitrogen. *Experimental Physiology* 21 (4): 1715-1726.
- [11] Dagnélie, P. 1987. *Théorie et méthodes statistiques, application agronomique*. Volume 2. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique. 463 p..
- [12] Doubi, B.T.S, K.I. Kouassi, K.L. Kouakou, K.K. Koffi, J.P. Baudoin & B.I. A. Zoro, 2016. Existing competitive indices in the intercropping system of *Manihot esculenta* Crantz and *Lagenaria siceraria* (Molina) Standley. *Journal of Plant Interactions* 11(1): 178-185.
- [13] FAO. 2005. *Guide de nutrition familiale*. Rome.
- [14] Francis, C.A (Ed.). 1986. *Multiple Cropping*. Macmillan Publishing Company. 866 Third Avenue, New York, NY 10022.
- [15] Francis, C.A. 1989. Biological efficiencies in multiple-cropping systems. *Advances in Agronomy* 42: 1-42.
- [16] Frankow-Lindberg, B.E. & A.S. Dahlin. 2013. N₂ fixation, N transfer and yield in grassland communities including a deep rooted legume or non-legume species. *Plant and Soil* 370: 567-581.
- [17] Fukai, S. 1993. Intercropping bases of productivity. *Field Crops Research* 34: 239-245.
- [18] Giller, K.E., J. Ommesher & F.M. Awah. 1991. Nitrogen transfer from Phaseolus bean to intercropped maize measured using ¹⁵N-enrichment and ¹⁵N-isotope dilution methods. *Soil Biology and Biochemistry* 23 (4): 339-346.
- [19] Harumukiza, I. & T. Ndamuhawenayo. 2026. Variation spatiale des principaux paramètres chimiques du sol dans la commune Vugizo. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Faculté des Sciences Agronomiques. Université du Burundi. 152 p.
- [20] Hiebsch CK & RE McCollun. 1987. Area x Time Equivalency Ratio: a method for evaluating the productivity of intercrops. *Agron. J.* 79:15-22.
- [21] Hiebsch, C.K. F. Tetio-Kagho, A.M. Chiremba & P. Gardner. 1995. Plant density and soybean maturity in a soybean-maize intercrop. *Agron. J.* 87: 965-969.
- [22] ISABU, 2018. Catalogue des variétés de haricot en diffusion au Burundi. 42 p.
- [23] ISTEEBU, 2018. Enquête Nationale Agricole du Burundi (ENAB). Résultats de la campagne agricole 2017-2018. Bujumbura, 139 p.
- [24] ISTEEBU. 2015. *Annuaire des Statistiques de l'Environnement du Burundi*. 60 p.
- [25] Kabura, D. & P. Manirambona. 2016. Variation spatiale des principaux paramètres chimiques dans la commune Mabanda. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Faculté des Sciences Agronomiques. Université du Burundi.
- [26] Kibiriri, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin & P. Hollebosch. 1986. Analyse des sols. Sols 2 : Analyse des bases échangeables, de la CEC et de l'acidité échangeable. ISABU. 33 p.
- [27] Kibiriri, C., S. Ndayiragije, J. Gourdin & P. Hollebosch. 1986. Analyse des sols. Sols 4 : Détermination du pH et de la conductivité électrique. Analyse de la matière organique. Fiche Labo N° 12. ISABU. 35 p.
- [28] Knörzer, H., S. Graeff-Hönninger, B. Guo, P. Wang & W. Claupein. 2009. The rediscovery of intercropping in China: A traditional cropping system for future Chinese Agriculture - A review. In *Climate change, intercropping, Pest Control and beneficial microorganisms*. pp. 13-44. Springer.

- [29] Latati, M. A. Bargaz, B. Belarbi M. Lazali, S. Benlahrech, S. Tellah, G. Kaci, J.J. Drevon & S.M.Ounane, 2016. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *European Journal of Agronomy*. Volume 72: 80-90.
- [30] Li L. S. Yad, X.Li & P. Christie. 1999. Interspecific complementary and competitive interactions between intercropped maize and faba bean. *Plant and Soil* 212: 105-114.
- [31] Lithourgidis, A.S., C.A. Dordas, C.A. Damalas & D.N. Vlachostergios. 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5(4): 396-410.
- [32] Mertens, A. 1984. Contribution à la connaissance des régions naturelles du Burundi: le système traditionnel
- [33] MINAGRIE, 2016. Fiches techniques des cultures de haricot et maïs au Burundi. 4 p. (cumulées).
- [34] Ming, F.K., A.P.K. Tai, T. Yong, X. Liu & H-M. Lam. 2019. Co-benefits of intercropping as a sustainable farming method for safeguarding both food security and air quality. *Environmental Research Letters*. Volume 14 (4). IOP Publishing Ltd.
- [35] Morgado, L. B. & R. W. Willey. 2008, Optimum plant population for maize-bean intercropping system in the Brazilian semi-arid region. *Scientia Agricola* 65 (5):474-480.
- [36] Mousavi, S.R. & H. Eskandari. 2011. A general overview on intercropping and its advantages in sustainable agriculture. *J. Appl. Environ. Biol. Sci.* 1 (11): 482-486.
- [37] Nassary, E.K, F. Bajjukya & P.A. Nakidemi, 2020. Productivity of intercropping with maize and common bean over five cropping seasons on smallholder farms of Tanzania. *European Journal of Agronomy*. Volume 113. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125964>.
- [38] Rusinamhodzi, L. M. Corbels, J. Nyamangara & K.E. Giller. 2012. Maize-grain legume intercropping is an attractive option for ecological intensification that reduces climatic risk for smallholders' farmers in Central Mozambique. *Field Crops Research* 136: 12-22.
- [39] Sibomana, R. S. Kaboneka, N. Bakundukize, D. Niyonkuru, E. Buzoya, L. Bukobero & H. Hariyongabo. 2020. Biological, nutritional and economic benefits of cassava-maize-bean intercropping in Kirimiro and Mumirwa agro-ecological zones, Burundi. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering (IJASRE)*. Volume 6(4): 135-151. April 2020.
- [40] Spio, K. 2010. Intercropping – The hidden revolution: A solution to land scarcity and household food security. *Agrekon*. Volume 35 (4): 266-270.
- [41] Sottiaux, G. L. Opdecamp, C. Bigura & R. Frankart. 1988. Carte des Sols du Burundi (1/250.000). Notice explicative et annexes analytiques. Publ. Serv. Agricole N°9. AGCD. Bruxelles, Belgique.
- [42] Tessens, E. & J. Gourdin. 1993. Critères d'interprétation des analyses pédologiques. Fiche Labo N°19. ISABU. 36 p.
- [43] Yakuza, I. 2011. Review of some methods of calculating intercrop efficiencies with particular reference to the estimates of intercrop benefits in wheat/faba bean system. *International Journal of Biosciences* Vol 1 (5) : 18-30.
- [44] Young, W.Y. 1989. Méthode d'enquête sur la gestion des entreprises agricoles. FAO, Rome. 246 p.
- [45] Zaeem, M., M. Nadeem, T.H. Pham, W. Ashiq, W. Ali, S.S. M. Gilani, S. Elavarthu, V. Kavanagh, M. Cheema, L. Galagedara & R. Thomas. 2019. The potential of corn-soybean intercropping to improve the soil health status and biomass production in cool climate boreal ecosystem. *Scientific Reports* 9, 13148.
- [46] Zhang G., Z. Yang & S. Dong, 2011. Interspecific competitiveness affects total biomass yield in an alfalfa and corn intercropping system. *Field Crops Res.* Doi:101016/j.fcr.2011.06.006.
- [47] Zhang, H., F. Zeng, Z. Zou, Z. Zhang & Y. Li. 2017. Nitrogen uptake and transfer in a soybean/maize intercropping system in the karst region of Southwest China. *Ecology and Evolution*. <https://doi.org/10.1002/ece3.3295>.