Afrique SCIENCE *14(4) (2018) 423 - 438*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Réponse du maïs aux effets de réhabilitation de la fertilité des sols liés à la légumineuse *Crotalaria juncea* L. au Nord-Cameroun

Taïda Pierre HINIMBIO[1*], Ali MADI[2], Jean Pierre MVONDO AWONO[3] et Désiré TSOZUE[4]

[1] *Société de Développement du Coton du Cameroun, Direction de la production agricole, Garoua, Cameroun*
[2] *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Département de l'agriculture et des produits dérivés, Maroua, Cameroun*
[3] *Université de Ngaoundéré, Faculté des Sciences, Département des sciences de la terre, Ngaoundéré, Cameroun*
[4] *Université de Maroua, Faculté des Sciences, Département des sciences de la terre, Maroua, Cameroun*

* Correspondance, courriel : *pierre.taida@sodecoton.cm*

Résumé

Le présent travail porte sur la réponse du maïs aux effets de réhabilitation de la fertilité des sols dégradés, par usage de la légumineuse *Crotalaria juncea* L. au Nord-Cameroun. Il vise en effet l'évaluation de l'effet d'inversion de la dégradation des sols et de baisse de rendements, à travers le système de culture sur couverture végétale (SCV) avec la crotalaire comme plante de couverture. Pour y parvenir, un dispositif expérimental en bloc de Fischer à 7 traitements et à 4 répétitions a été ainsi mis en place sur deux sites : Kodek et Zouana. Cette étude nous montre que 85 % de plants de *Crotalaria juncea* à Kodek et 75 % à Zouana ont des nodosités observables, avec respectivement 6,71 et 5,60 nodosités/plant et 61,96% et 51,22% de nodosités efficaces (à leghémoglobine). La valeur moyenne de remplacement en azote des exsudats du traitement Crotalaire-Maïs (CM) est de 40 et 38 kg N/Ha ; et celle de la minéralisation partielle du *mulch* de *Crotalaria juncea* (C) est de 196 et 184 kg N/Ha respectivement à Kodek et Zouana. Ce qui illustre bien que la crotalaire, en association comme en paillage, contribue à inverser la tendance de dégradation de la fertilité du sol, par l'apport d'azote pour la nutrition minérale des cultures. Ce qui s'est traduit en gain de rendements du maïs par rapport au témoin non fertilisé (N0) aussi bien en association (CM) soit 14,08 % à Kodek et 13,89 % à Zouana ; que sur *mulch* (C) soit 38,03 % à Kodek et 34,72 % à Zouana. Mais, pour vulgariser davantage ce système productif et protecteur de l'environnement, l'appui des pouvoirs publics et la concertation entre les acteurs (agriculteurs, éleveurs, etc.) sur les usages concurrentiels des sols sont importants.

Mots clés : *sol, réhabilitation agroécologique, maïs, symbiose Rhizobium-Crotalaria juncea, Nord-Cameroun.*

Abstract

Maize response to soil fertility rehabilitation effects related to the legume Crotalaria juncea L. in North Cameroon

The present work involves on the maize response due to the management of the degraded soil fertility through the leguminous Crotalaria juncea specie. It is based on the evaluation of soil effect restoration due to this cover plant, conducted in North-Cameroon as a new cropping system known under conservation agriculture or direct seeding mulch-based cropping system (DMC). The system was compared to conventional

system on randomized Fischer plots design in Kodek and Zouana, with 7 modalities and 4 repetitions. The analysis shows that 85 % of Crotalaria juncea plants in Kodek and 75 % in Zouana have nodules, and respectively 6.71 and 5,60 nodules/plant and then 61.96 % and 51.22 % efficacious nodules, having leghemoglobine. The mean replace nitrogen value obtained from exudates on Crotalaria juncea-maize (CM) association system is 40 and 38 kg N/ha ; and value obtained on mulch of Crotalaria juncea (C) after partial mineralization is 196 and 184 kg N/ha respectively on Kodek and Zouana sites. This means that the bioresource Crotalaria juncea contributes both in association and on mulch to alleviate soil degradation and increases soil nitrogen content for mineral plants nutrition. This is expressed by maize yield improvement compared to reference witness unfertilized plot (N0) both in association (CM) : 14.08 % in Kodek and 13.89 % in Zouana ; and on mulch (C) : 38.03 % in Kodek and 34.72 % in Zouana. But, to promote this system, the public service support and the actors (farmers, breeders, etc.) consultation on natural competitive resources are important.

Keywords : *soil, agroecology rehabilitation, maize, Rhizobium-Crotalaria juncea symbiosis, North-Cameroon.*

1. Introduction

La zone soudano-sahélienne d'Afrique est soumise à la dégradation de ses ressources naturelles et cette dégradation émerge comme étant l'un des problèmes les plus graves pour l'humanité [1]. Elle reste un risque mondial car affecte la productivité des écosystèmes naturels qu'ils soient agricoles, pastoraux ou forestiers [2]. Les sols constituent l'une des ressources les plus menacées, en raison de l'impact de l'activité humaine sur leur dynamique [3]. Les sols remplissent en effet de nombreuses fonctions économiques et écologiques, indispensables aux écosystèmes et aux sociétés humaines ; ils sont un déterminant essentiel de la sécurité alimentaire et de la production des biomatériaux [4]. L'ONU relevait au sommet de septembre 2015 à New-York que 52 % des terres agricoles sont touchées par la dégradation des sols qui concerne ainsi 1,5 milliard de personnes, soit 57,69 % des agriculteurs. La perte des terres arables serait donc de 30 à 35 fois plus rapide que le rythme historique et la sécheresse ainsi que la désertification provoquent chaque année la perte de 12 millions d'hectares (soit 23 hectares qui deviennent inutilisables par minute), sur lesquels on aurait pu cultiver 20 millions de tonnes de céréales [5]. L'Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI) situait cette perte entre 5 à 10 millions d'hectares au monde en 1995. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n'ont été autant dégradés par la présence humaine, relève Marc Bied-Charreton [6]. Et cette situation s'aggrave à cause d'une utilisation irrationnelle du sol et de l'eau, sous les effets actuels du changement climatique [7]. À l'Extrême-Nord du Cameroun, sur environ 10 millions d'hectares de terres cultivables, 10 à 20 % sont entièrement dégradés en hardé, 30 à 40 % ont évolué en terres marginales [8]. Les mauvaises pratiques agricoles conduisent donc aux hardés et accentuent la baisse de fertilité des sols qui provoque ensuite une baisse de rendement [9]. Ce qui a été observé sur la culture de coton dans le secteur de Kaélé, avec une baisse de 44,16 % de 1992 à 2012 [10] et en moyenne -8,4 kg/Ha/an sur la période de 1980 à 2010 [11]. Du problème de dégradation des sols et de baisse des rendements ainsi observé, il est important de préserver le patrimoine sol dans l'optique d'accroître la productivité agricole. L'une des options de régression de ce processus est l'utilisation des techniques innovantes à productivité durable et protectrices de l'environnement. Aussi, la réhabilitation agroécologique s'avère-t-elle une solution à la dégradation des terres et aux changements climatiques. Une politique de réhabilitation écologiquement viable doit en effet prendre en compte la réintroduction d'espèces végétales dans les agrosystèmes [12]. Ainsi, cette étude se veut évaluer la contribution de la légumineuse *Crotalaria juncea*, à travers son potentiel de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique avec *Rhizobium japonicum* et évaluer la valeur de remplacement en fertilisant azoté de par la réponse du maïs aux SCV à base de la crotalaire en comparaison aux différents niveaux de fertilisation azotée.

2. Matériel et méthodes

2-1. Milieu biophysique de Kodek et de Zouana

L'étude a été conduite sur deux sites expérimentaux : Kodek et Zouana au Nord-Cameroun ***(Figure 1)***. Le site de Kodek est situé au Nord-Est de Maroua, chef-lieu de la région de l'Extrême-Nord Cameroun et la zone est exploitée depuis plus de 50 ans pour des productions agropastorales. Les géoréférences de ce site sont : 10°39.130'N, 14°25.556'E, 433 m d'altitude. Le paysage est une savane herbeuse et arbustive, avec à certains endroits d'importants pieds d'épineux. Parmi les herbacées présentes, il est observé une dominance nette des Graminées. Le relief est une pénéplaine à pente faible (moins de 1 %). Les vertisols topomorphes caractérisent ce site et le type d'argile est la montmorillonite [13]. Ces sols sont décrits comme des sols peu évolués d'apport alluvial. Ils sont de couleur brun-grisâtre foncé, montrant parfois quelques taches et traînées rouille indiquant localement une hydromorphie de courte durée (mais en principe, pas d'inondation). Leur texture est limono-argileuse à argilo-limoneuse (20 à 40 % d'argile). Mais des lentilles de sable grossier à très grossier, signes de dépôts en milieu plus turbulent (arrivée d'un mayo par exemple), peuvent exister entre 60 et 200 cm de profondeur. Elles fonctionnent comme réserve d'eau (nappes perchées) ou comme drain. Ces lentilles sableuses restent souvent humides en saison sèche.

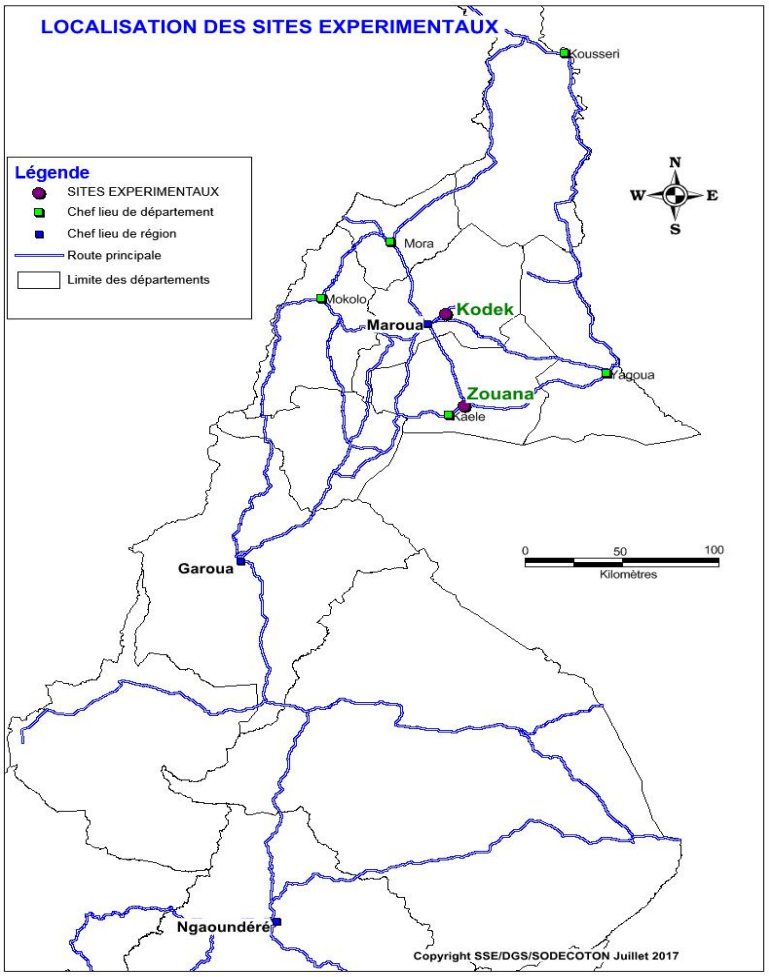

Figure 1 : *Localisation des sites de Kodek et de Zouana*

Le site de Zouana ***(Figure 2)*** est situé au Nord-Est de Kaélé, chef-lieu du département du Mayo Kani, région de l'Extrême-Nord Cameroun. Il a été mis en expérimentation en 2002 par le projet ESA pour la mise au point

des références agronomiques de la zone. Les références géographiques de Zouana sont : 10°08.935' N, 14°30.285' E et 383 m d'altitude. L'exploitation agricole de cette zone s'est intensifiée avec l'avènement en 1950 de la culture cotonnière, encadrée par la Compagnie Française pour le Développement des Fibres Textiles (CFDT), puis par la SODECOTON. Ce qui a fait plus de soixante ans d'exploitation plus ou moins continue de ces sols et beaucoup de parcelles étaient donc abandonnées du fait de leur improductivité.

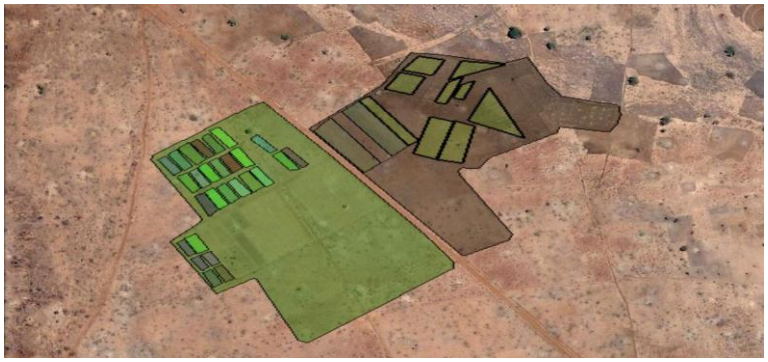

Figure 2 : *Site expérimental de Zouana (SODECOTON/CSE, 2012)*

Son relief est une pénéplaine mollement ondulée à pente faible (moins de 1 %). Ce relief constitue la pédiplaine de Kaélé, sous-tendue par un socle cristallin et métamorphique, constitué de gneiss subaffleurant et affleurant. Le gneiss est composé de quartz-diorite et partout traversé par des granites divers, qui émergent en inselbergs dans les pédiments et les plaines de piémonts [14]. Les vertisols à phase érodée très fréquente caractérisent le type de sols de Zouana, qui sont aussi qualifiés de sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes ou sols gravillonnaires.

2-2. Dispositif expérimental de l'étude

Pour chacun des sites expérimentaux (Kodek et Zouana), un dispositif expérimental a été mis en place en l'occurrence un bloc randomisé (de Fischer) à 7 traitements et à 4 répétitions présenté comme suit :

R 1	CM	C	N3	N2	N0	N4	N1
R 2	N4	N3	N0	CM	N1	C	N2
R 3	N0	N2	C	N1	N4	CM	N3
R 4	C	CM	N1	N4	N2	N3	N0

Les parcelles (4 m x 4 m chacune) sont contiguës sur la même répétition ou sous bloc et séparées de 1 m entre les répétitions. Les différentes modalités sont donc :

- C : parcelle de *Crotalaria juncea* en monoculture, suivie la campagne suivante du maïs sans apport d'azote,
- CM : parcelle de maïs en association avec la crotalaire
- N0 : parcelle de maïs avec 0 kg/Ha d'azote
- N1 : parcelle de maïs avec 80 kg/Ha d'azote
- N2 : parcelle de maïs avec 160 kg/Ha d'azote
- N3 : parcelle de maïs avec 240 kg/Ha d'azote
- N4 : parcelle de maïs avec 320 kg/Ha d'azote.

Le piquetage des parcelles avec des gabarits de bois et un pentadécamètre a précédé l'exploitation du dispositif. Seuls les traitements C ont été conduits en 1ère année avec la mise en place de plants de *Crotalaria juncea*, les autres parcelles étant restées en jachère et n'ont été exploitées en maïs qu'en 2ème année aussi bien que les modalités C. Chaque dispositif a été donc conduit sur 532 m^2 avec la même date de semis et la même densité de semis du maïs.

2-3. *Crotalaria juncea*

La crotalaire (*Crotalaria juncea L.*) est une plante tropicale annuelle, de la famille botanique des Fabacées, constituant les Légumineuses, sous famille des *Faboideae*, tribu des *Crotalarieae*. La crotalaire est une bioressource dont la garniture chromosomique est de 2n = 16 [15]. Aussi connue sous l'appellation de cascavelle, sonnette, chanvre indien, chanvre du Bengale et même *sunn herb, sunn hemp* ou *india hemp* en Anglais, *Crotalaria juncea* est un arbuste érigé, généralement de 1 à 4 m de haut, avec une tige cylindrique d'environ 2 cm de diamètre. Elle se développe mieux dans un sol où les phosphates sont facilement mobilisables et tolère le sol à pH compris entre 5 et 8,4 ; l'idéal étant un pH proche du neutre (6-7). Elle se multiplie par graines dont le poids de 1000 graines est d'environ 30-55 g et ces graines contiennent 34,6 % de protéines crues (Duke, 1983). Sa production est en général limitée par les conditions pédoclimatiques, ce qui contribue à élever le prix de semences, qui est en moyenne de 1500 FCFA/kg au Nord-Cameroun. Le semis est fait avec une corde marquée et elle donne autour de 90 JAS un aspect ornemental avec des feuilles vertes et des fleurs jaunes. L'espèce *Crotalaria juncea* présente des intérêts agronomiques, économiques, médicinaux et dans l'intégration aux systèmes de cultures. Elle est ainsi utilisée comme plante médicinale et culinaire par plusieurs communautés.

2-4. Maïs

Du nom scientifique *(Zea mays)*, le maïs est décrit par Linné en 1753 et appartient à la famille botanique des Poacées aussi appelée Graminées, tribu des *Andropogoneae*. C'est une céréale herbacée annuelle monoïque, à tallage généralement faible ou même nul. Il peut présenter une large diversité morphologique selon les variétés, avec 250 races identifiées et regroupées en 14 complexes raciaux [16]. La plante possède d'abord des racines séminales, fonctionnelles jusqu'au stade 5 ou 6 feuilles, puis des racines définitives ou coronaires, qui peuvent atteindre 1 m ou plus de profondeur. Le système racinaire est fasciculé et son ancrage permet d'éviter la verse. L'azote est le nutriment le plus important du maïs. En côte d'Ivoire par exemple, pour produire 3 tonnes/Ha, on recommande 300 kg/ha de 10-18-18 au semis et 45 unités d'azote à la montaison. Au Gabon, pour 5 tonnes/Ha, il est recommandé 120 kg de N ; 70 kg de P_2O_5 et 60 kg de K_2O [16]. Ainsi, pour produire 5 tonnes/Ha, les quantités d'éléments minéraux prélevés au sol sont estimées et consignées dans le ***Tableau 1***.

Tableau 1 : *Quantités de minéraux (kg) pour produire 50 quintaux/ha de maïs soit 5000 kg/ha de grains (CIRAD-GRET, 2002)*

Elément	Azote (N)	Acide phosphorique (P_2O_5)	Potasse (K_2O)	Chaux (CaO)	Magnésie (MgO)	Soufre (S)
Quantité (parties aériennes plante)	105	50	75	10	10	6
Quantité (5 t grains)	70	35	25	1,5	4,5	5

Dans le bassin cotonnier du Nord-Cameroun, le maïs connaît une expansion considérable, avec un intérêt économique de plus en plus croissant. Il est cédé entre 1500 et 2500 F CFA/kg selon la période de vente et la loi de l'offre et de la demande. Il assure ainsi, aux agriculteurs de cette zone, un revenu monétaire à hauteur

de 14 % ; tandis que le coton en assure 64 %, l'arachide 11 %, le sorgho pluvial 4 %, le sorgho *Muskwaari* 2 %, le niébé 2 %, et les autres cultures (sésame, oignon, igname, etc.) 3 % (Adoum et *al.*, 2006). En culture irriguée, on peut obtenir un rendement de 6 à 9 tonnes/Ha de grains de maïs, avec 80 tonnes/Ha de fourrage. En culture intensive ou commerciale, la même marge de rendement est obtenue, mais avec seulement 33 tonnes/Ha de fourrage ; tandis qu'en culture traditionnelle, le rendement moyen des grains est de l'ordre de 1,5 tonne/Ha. Le maïs supporte le pH variant entre 4,3 et 8,5 ; mais l'optimum se situe entre 5,5 et 7,8. Il n'y a pas de baisse de rendement lorsque la conductivité électrique, indicatrice de la salinité, est inférieure à 1,7 mmhos/cm ; mais le rendement est réduit de 50 % lorsque la sodicité (ESP) est à 15 %. Un sol de structure particulaire, de texture argilo-limoneuse est à préférer.

2-5. Évaluation du potentiel de fixation symbiotique de l'azote

L'évaluation de la fixation symbiotique de l'azote par la légumineuse *Crotalaria juncea* dans les sites expérimentaux a été conduite sur les 4 parcelles de *Crotalaria juncea* par site en première saison culturale. Ceci, après avoir utilisé des semences saines de cette essence, avec un taux de germination de 97 %, testé sur une période de 10 jours. A 60 JAS, 5 plants de *Crotalaria juncea* par parcelle, soit 20 plants par site de référence, ont été déracinés pour déterminer par comptage le nombre de nodosités par plant aptes à la fixation symbiotique de l'azote. Ce comptage a été fait à travers une minutieuse observation et la prise en compte de la présence ou non dans les nodosités du pigment rose, la leghémoglobine, indicateur de cette fixation symbiotique. En effet, dans la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique, les racines d'une légumineuse rencontrent, dans leur rhizosphère, la race de *Rhizobium* qui convient. Le micro-organisme pénètre, en quelques heures, dans les racines de la plantule, par les poils absorbants dans le cortex ou par des blessures, et provoque des modifications cellulaires. Les cellules formées, généralement tétraploïdes, constituent des nodosités bactériennes, qui sont des excroissances ou des galles (bactériocécidies) de type tumoral, de forme plus ou moins sphérique, se trouvant à la surface des racines. Ainsi, les nodosités roses à leghémoglobine sont dites efficaces ***(Figure 3)*** les nodosités blanches sont dites inefficaces ***(Figure 4)*** à cette fixation. Après comptage des nodosités, les plants déracinés sont laissés sur les parcelles pour constituer la biomasse.

Figure 3 : *Nodosités efficaces*

Figure 4 : *Nodosités inefficaces*

2-6. Production et évaluation des rendements du maïs

La démarche a consisté de suivre l'itinéraire technique de production du maïs, mais aussi d'évaluer et comparer les rendements obtenus *(output)* en SCV et sur les différents niveaux de fertilisation en N *(input)* sur les deux sites expérimentaux ; et en déterminer la valeur de remplacement en fertilisant azoté inhérente à

l'usage de *Crotalaria juncea.* La production du maïs a été conduite de façon méthodique en deuxième année culturale sur le dispositif expérimental randomisé. La préparation du terrain a consisté au défrichage préalable notamment de quelques pieds isolés d'arbustes. Le semis direct des semences du maïs a été effectué sur un sol non labouré, d'une part sur la biomasse de *Crotalaria juncea* et d'autre part sur les parcelles non cultivées la campagne précédente. Toute la biomasse de la première campagne a été maintenue sur place et protégée contre le bétail par des épines entourant le dispositif. En association ou non, le maïs a été semé à 80 cm entre les lignes et 25 cm entre les poquets sur la ligne, deux graines par poquet de 3 cm de profondeur au semis, mais le démariage a été fait à un plant par poquet, soit une densité de 100000 plants/Ha. Cette densité a été conservée sur toutes les parcelles, pour avoir procédé à un remplacement systématique des plants crevés avant 40 JAS. Ce qui était d'ailleurs très négligeable, soit 0 à 3 plants par parcelle de 16 m^2, représentant ainsi 0 à 3 plants sur 160 plants. Les plants de remplacement ont été prélevés sur une parcelle contiguë au dispositif semée à la même date et n'ayant pas eu d'apport d'engrais. Le semis du maïs a été effectué le 27 juin 2016 à Kodek et le 28 juin 2016 à Zouana.

La variété CMS 9015, résistante au *streak* ou à la striure (maladie virale) a été utilisée, car mieux adaptée et plus productive que CMS 8501 et CMS 8704 ; elle est résistante à la maladie virale *streak* ou striure et tolérante au *Striga hermonthica*. C'est une variété précoce, avec un cycle de 90 jours et un potentiel de production de 5 tonnes/Ha. La *Crotalaria juncea* en association avec le maïs a été semée 30 jours après le semis de la céréale pour limiter les effets de concurrence, ceci au milieu des lignes du maïs, soit un espacement de 40 cm de la ligne du maïs et 25 cm entre les poquets. Ce semis a été conduit dans des poquets de 2 cm de profondeur, à raison de 3 graines par poquet. Les semences ont été au préalable traitées avec une formulation à poudre mouillable : Momtaz® 45WS, fait de l'insecticide imidaclopride et du fongicide Thirame (25 % imidaclopride + 20 % Thirame). Ce produit est classé par la FAO et l'OMS en III, donc peu dangereux, avec une DL 50 dermale ou orale supérieure à 2000 mg/kg. Un sachet de 50 g du produit a ainsi été mélangé à 5 kg de semences de maïs. Le glyphosate a été utilisé en prélevée pour contrôler les adventices sur les parcelles. L'appareil Handy à 5 piles électriques a servi pour cette pulvérisation. Pour la fertilisation du maïs, l'urée 46 % N de formule NH_2-CO-NH_2 a été utilisé à des doses variables. Les quantités d'azote et d'urée appliquées sur les parcelles de 16 m^2 ont été calculées et pesées sur la balance électronique MEDIFIELD.

Pour la détermination de la quantité d'urée à partir de la dose d'azote à appliquer, la teneur de 46 % en azote de l'urée a été prise en compte. Les différentes doses d'azote ont été conditionnées après pesée dans des plastiques biodégradables avant leur transport et leur épandage à 30 JAS sur les sites d'étude à dose non fractionnée pour garder l'uniformité des applications ; bien que le fractionnement de l'apport d'engrais azoté à dose importante, permet d'augmenter le coefficient réel d'utilisation de l'azote. L'épandage de l'urée a été suivi immédiatement de l'enfouissement pour limiter la volatilisation et l'exportation hors des parcelles avec les eaux de ruissellement, avec l'ultime but de favoriser la nutrition du maïs. Pour le contrôle de l'enherbement, le sarclage manuel à la houe a été effectué sur les parcelles témoins et le désherbage manuel par arrachage des adventices a été opéré sur les parcelles en mulch ; ceci à 21 JAS, 42 JAS et 63 JAS sur toutes les parcelles, soit une fréquence de 3 semaines. La récolte du maïs est intervenue à 90 JAS et les épis ayant atteint la maturité physiologique, ont été prélevés sur les deux lignes centrales de 4 m. Ils ont été conditionnés dans des sas en polypropylène après avoir enlevés la spathe. Après 2 semaines de séchage à l'air libre sous toit, les différentes récoltes ont été égrenées à la main, puis pesées pour déterminer les différents rendements.

2-7. Détermination de la valeur de remplacement en fertilisant azoté

Après la production du maïs sur les différents systèmes, il a aussi été important d'évaluer la valeur de remplacement en fertilisant azoté de la crotalaire ou l'apport d'azote dans le sol par la fixation symbiotique

de l'azote et même à travers la minéralisation de sa biomasse. Ce qui en outre a permis de définir la courbe de réponse (N, C) liée aux différents rendements, de situer le rendement du maïs obtenu sur le précédent de *Crotalaria juncea* sans apport d'engrais ainsi que celui de l'association maïs-crotalaire. La courbe de réponse ou courbe de rendement a été également déterminée.

2-8. Pesée, analyse et traitement des données

La pesée des échantillons du maïs a été menée au laboratoire de l'IRAD de Maroua ; ceci à l'aide d'une balance électronique appelée MEDIFIELD, *Equipment et Scientific LTD*, de précision plus ou moins 2 g. Le nombre d'épis de maïs ayant été relevé à la récolte sur 2 lignes (4m x 2), la pesée a permis de déterminer le poids total en kg des épis sans égrenage, puis le poids total du maïs manuellement égrené obtenu sur 8 m ; ce qui a conduit par extrapolation à la détermination du rendement du maïs en kg/ha. Le test de Duncan a été utilisé pour l'analyse statistique des différents rendements ; ceci à travers le logiciel de traitement des données IBM SPSS Statistics, version 20, mise à jour en 2011. Pour la détermination de la valeur de remplacement en fertilisant azoté, les images des courbes de rendements ont été capturées et traitées sur le logiciel *Snagit 12 Editor*, version *TechSmith* du 16 Décembre 2016.

3. Résultats

3-1. Potentiel de fixation symbiotique de l'azote

On observe à priori que certains plants de *Crotalaria juncea* ne portent pas de nodosités. On a par contre 85 % de plants à nodosités à Kodek et 75 % à Zouana, avec respectivement 6,71 et 5,60 nodosités/plant ***(Tableau 2)***. La détermination de l'efficacité des nodosités par l'observation de la leghémoglobine a permis d'avoir 61,96 % de nodosités efficaces à Kodek et 51,22 % à Zouana ***(Figure 5)***. La proportion plus importante de terre fine à Kodek, soit 87,10 % par rapport à celle de Zouana qui est de 57,97 % aurait favorisé le développement des nodosités et plus précisément des nodosités efficaces. L'azote ainsi fixé est utilisé par la plante hôte dont *Crotalaria juncea* pour sa croissance et son développement et l'azote du sol s'accroît à travers des exsudats racinaires ou une désintégration des nodosités, une destruction ou pourriture des émondes et composés. En retour, la plante hôte fournit aux bactéries les hydrates de carbone, d'où la fonction symbiotique. La nodosité met donc à la disposition du bactéroïde du carbone organique sous une forme assimilable. Ainsi, le saccharose est transporté des feuilles aux nodosités, où il subit une dégradation partielle. Et c'est sous la forme d'acides dicarboxyliques que le carbone pénètre dans le bactéroïde et fournit l'énergie nécessaire à la fixation.

Tableau 2 : *Taux de nodosités efficaces des plants de Crotalaria juncea à 60 JAS*

Site	Plants observés	Plants à nodosités	Nodosités efficaces	Nodosités non efficaces	Nodosités totales	Plants à nodosités (%)	Nodosités efficaces moyennes /plant	Taux de nodosités efficaces
Kodek	20	17	114	70	184	85%	6,71	61,96%
Zouana	20	15	84	80	164	75%	5,60	51,22%

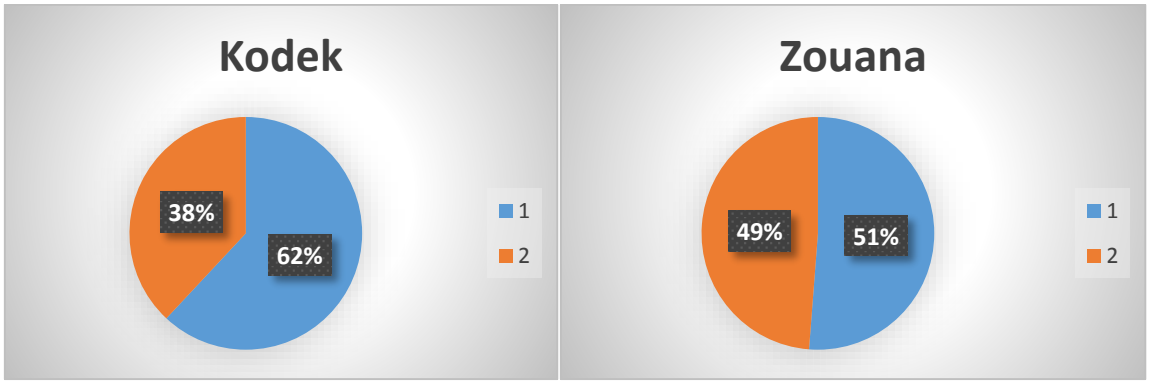

Figure 5 : *Taux de nodosités efficaces à Kodek et à Zouana*

1 : Nodosités efficaces 2 : Nodosités inefficaces

3-2. Rendements comparés en maïs

La détermination du rendement du maïs (kg/Ha) a été effectuée à partir de la pesée des épis puis des graines récoltés sur 8 m de chaque parcelle. Le ratio poids moyen de graines d'un épi sur le poids de l'épi a été aussi évalué à travers la pesée de 30 épis avant et après égrenage. Les poids des épis de maïs ainsi trouvés (95,24 g/épi à Kodek et 124,46 g/épi à Zouana) varient peu de ceux rapportés en 2004 [17] et qui se situent entre 106 et 114 g/épi. Les différents rendements obtenus sur les parcelles sont présentés dans le ***Tableau 3***(Kodek) et le ***Tableau 4***(Zouana).

Tableau 3 : *Récapitulatif des rendements du maïs à Kodek (kg/Ha)*

Modalités	C	CM	N0	N1	N2	N3	N4
R 1	3387,88	2996,97	1693,94	2996,97	2866,66	3127,27	3909,09
R 2	2345,45	2345,45	1954,54	2345,45	3387,88	3257,57	2866,66
R 3	3648,48	2345,45	2866,66	3127,27	3648,48	3127,27	2996,97
R 4	3387,88	2866,66	2736,36	3387,88	2736,36	3387,88	3387,88
Moyenne	3192,42	2638,63	2312,87	2964,39	3159,85	3225,00	3290,15

Tableau 4 : *Récapitulatif des rendements du maïs à Zouana (kg/Ha)*

Modalités	C	CM	N0	N1	N2	N3	N4
R 1	3523,99	2981,84	2168,61	3388,46	3252,92	3523,99	4337,22
R 2	2710,76	2304,15	2304,15	2710,76	3523,99	3523,99	2575,23
R 3	3659,53	2710,76	3252,92	3252,92	3117,38	3795,07	3252,92
R 4	3252,92	3117,38	2033,07	3252,92	2981,84	3795,07	3659,53
Moyenne	3286,80	2778,53	2439,69	3151,27	3219,03	3659,53	3456,23

Le Test de Duncan au seuil de signification de 5 % a été appliqué pour tester s'il y a ou pas de différence significative entre les différents rendements obtenus sur le site de Kodek et celui de Zouana ***(Tableau 5)***.

Tableau 5 : *Rendements de maïs selon le test de Duncan*

Modalité de fertilisation	Rendement (kg/Ha) Kodek	Rendement (kg/Ha) Zouana
C	3192,4225 b	3286,8000 bc
CM	2638,6325 ab	2778,5325 ab
N0	2312,8750 a	2439,6875 a
N1	2964,3925 ab	3151,2650 bc
N2	3159,8450 b	3219,0325 bc
N3	3224,9975 b	3659,5300 c
N4	3290,1500 b	3456,2250 bc

Du ***Tableau 5***, on remarque qu'à Kodek, les traitements CM, N0 et N1 sont statistiquement identiques mais diffèrent significativement des traitements C, N2, N3 et N4. Ce qui signifie que l'association crotalaire-maïs (CM) a un niveau de rendement qui ne diffère pas significativement du témoin N0 (0 kg de N/Ha) non plus de l'apport de 80 kg de N/Ha (N1). Par contre le maïs cultivé sur le mulch de la crotalaire sans autre apport d'engrais a un rendement statistiquement non différent du niveau de fertilisation de 160 (N2) ; 240 (N3) et 320 kg/Ha (N4). Pour le cas de Zouana, le traitement CM, même étant statistiquement identique à N0, se distingue de ce traitement pour être statistiquement identique à C ; N1 ; N2 et N4. A Kodek comme à Zouana, on constate que les exsudats racinaires issus des nodosités de l'espèce *Crotalaria juncea* en association avec le maïs permettent de relever le niveau de rendement du maïs. Ceci grâce à l'augmentation de la teneur en azote du sol, conséquence de la fixation symbiotique de celui-ci. Ce type d'apport en azote au sol est d'ailleurs estimé par le CIRAD-GRET (2002) entre 10 et 20 % de l'azote total symbiotiquement fixé. On remarque par ailleurs avec satisfaction que le rendement du maïs exploité sur le mulch se rapproche de ceux obtenus avec des niveaux plus ou moins élevés (160, 240 et 320 kg N/Ha).

Ce qui signifie que la minéralisation des plants de crotalaire contribue à augmenter la teneur en éléments fertilisants notamment l'azote. De même, le mulch permet de limiter l'effet de l'érosion sur le sol, en amortissant l'agressivité des pluies. Il permet aussi d'accroître la teneur en matière organique du sol, ce qui contribue à la stabilité structurale mais aussi à hausser sa capacité de rétention en eau, pour éviter le stress hydrique parfois observé au Nord-Cameroun pendant la période de mise en place des cultures (juin et juillet). Ce qui permet d'aller vers la stabilité climacique appelée biostasie, énoncée dans la théorie de bio-rhexistasie d'Henri Erhart, où lorsque la végétation couvre les sols, l'érosion mécanique devient faible, avec principalement une altération chimique. Par ailleurs, la bonne teneur du sol en matière organique permet aussi de retenir en plus de l'eau, les éléments minéraux sur le complexe absorbant ; lesquels éléments sont exposés à la percolation ou à la lixiviation en l'absence de celle-ci. Les éléments ainsi retenus sont facilement mobilisés par les plantes pour leur croissance et leur développement. Ce qui a permis d'obtenir des gains de rendements du maïs par rapport au témoin non fertilisé N0 : (i) en association : (2638,63 contre 2312,87 kg/Ha, soit 14,08% à Kodek et 2778,53 contre 2439,69 kg/Ha, soit 13,89% à Zouana) ; (ii) et sur *mulch* (C) (3192,42 contre 2312,87 kg/Ha, soit 38,03 % à Kodek et 3286,80 contre 2439,69 kg/Ha, soit 34,72 % à Zouana).

3-3. Valeur de remplacement en fertilisant azoté

La valeur de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) au site de Kodek pour les parcelles en association crotalaire-maïs (CM) est de 40 kg N/Ha et celle obtenue sur le mulch de *Crotalaria juncea* (C) est de 196 kg N/Ha ***(Figure 6)***. Ce qui signifie que les exsudats racinaires de *Crotalaria juncea* ont apporté au sol une quantité supérieure à 40 kg N/Ha et dont 40 kg N/Ha ont été prélevés par le maïs pour sa nutrition. En effet, le CIRAD-GRET (2002) indique que 80 à 90 % de l'azote symbiotiquement fixé notamment l'amide dit

asparagine, est transféré à la plante hôte à travers le xylème. Le reste (10 à 20 %) est excrété dans le sol généralement sous forme d'exsudats d'acides aspartique ou glutamique, puis prélevé par la plante, dont le maïs dans cette étude. En admettant que 40 kg N/Ha représentent la moyenne de 15 % d'azote excrété dans le sol, l'azote total symbiotiquement fixé par *Rhizobium japonicum* et *Crotalaria juncea* est donc de 266,67 kg/Ha/an en moyenne à Kodek. Par ailleurs, la minéralisation de la biomasse de la crotalaire aura permis de contribuer à la restauration du sol en apportant au moins 196 kg N/Ha au sol, mobilisés par le maïs pendant sa croissance et son développement.

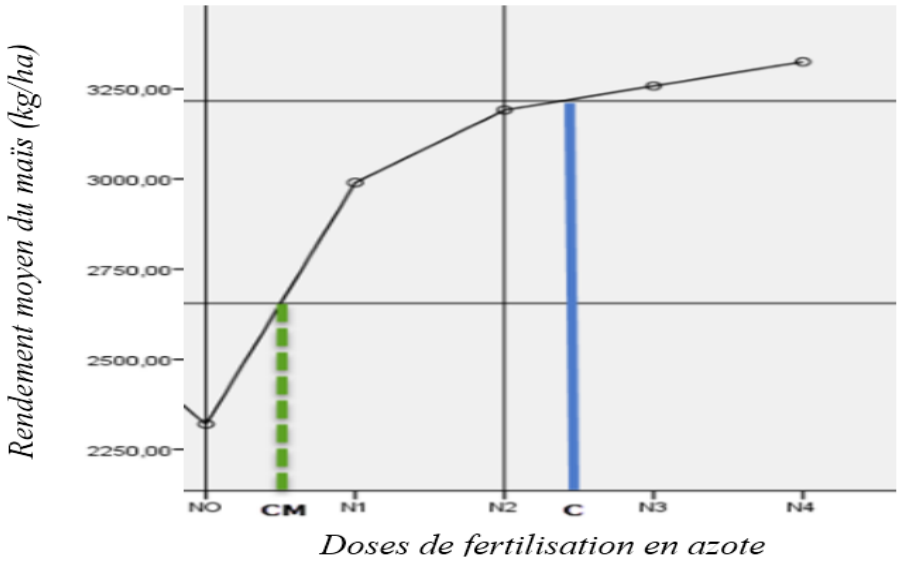

Figure 6 : *Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Kodek*

La valeur moyenne de remplacement en azote au site de Zouana pour les parcelles en association crotalaire-maïs (CM) est de 38 kg N/Ha et celle obtenue sur le mulch de la crotalaire (C) est de 184 kg N/Ha ***(Figure 7)***. On peut dire ainsi que les exsudats racinaires de la crotalaire ont permis au maïs de prélever 38 kg N/ha tandis que la minéralisation de sa biomasse a permis au maïs de mobiliser 196 kg N/Ha pour sa nutrition minérale. Sur la base d'une excrétion moyenne de 15 % d'azote dans le sol, l'azote total symbiotiquement fixé en partenariat entre *Rhizobium japonicum* et *Crotalaria juncea* est donc de 253,33 kg/Ha/an en moyenne à Zouana.

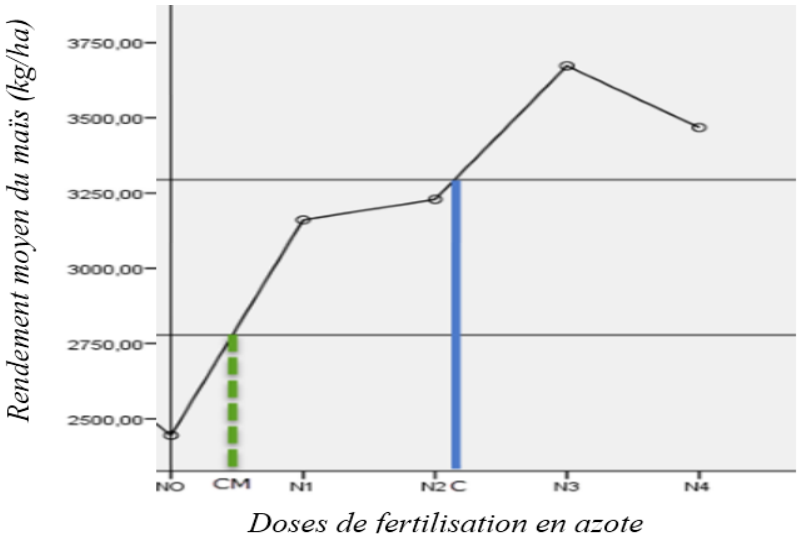

Figure 7 : *Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Zouana*

4. Discussion

De la présente étude, il ressort que l'espèce *Crotalaria juncea* assure effectivement avec *Rhizobium japonicum* la fixation symbiotique de l'azote au Nord-Cameroun. Dans cette symbiose, le complexe de la nitrogénase est très sensible à l'oxygène alors que l'énergie requise pour la fixation de l'azote implique une activité respiratoire aérobie chez les bactéroïdes. Ce paradoxe est résolu par la nodosité, qui apporte une triple protection par : (i) la forte demande d'oxygène générée par les activités oxydatives intenses qui s'y déroulent (protection respiratoire) ; (ii) son anatomie ou le parenchyme est peu perméable aux gaz ; (iii) et la formation d'une molécule propre à la symbiose, la leghémoglobine qui se lie fortement à l'oxygène [16]. On observe que la crotalaire mise en place en première année de culture a permis d'améliorer la structure du sol, car ses racines assurent le labour biologique du sol et ramènent en surface les éléments nutritifs des plantes lessivés ou jadis stockés en profondeur du sol. En effet, la minéralisation des résidus libère l'azote fixé par les légumineuses. La quantité d'azote libérée pour la culture suivante est alors fonction de la biomasse produite, du mode de destruction et du C/N des résidus (souvent faible pour les légumineuses). Cependant, la dégradation de ces résidus étant assez rapide en cas de culture associée de type colza-légumineuses, détruites en cours de cycle, la culture de colza peut alors bénéficier en partie de l'azote minéralisé [18].

La valeur de remplacement en fertilisant azoté au site de Kodek de 40 kg N/Ha pour le traitement crotalaire-maïs et de 196 kg N/Ha pour celui du maïs sur mulch et respectivement de 38 kg N/Ha et de 184 kg N/Ha à Zouana. En 2012 [11], il a été observé pour les mêmes types de parcelles en rotation annuelle avec le riz, que la quantité d'azote dans les résidus varie et peut doubler avec le type de plante de couverture. Ainsi, il a été obtenu 123 kg N Ha^{-1} pour la *Dolichos lablab* contre 236 kg N Ha^{-1} pour *Vicia villosa*. Ces valeurs de la *Vicia villosa* sont plus élevées que celles observées en 2006, qui varient de 76 à 167 kg N Ha^{-1} selon les années. Il a été également observé que malgré la quantité faible de biomasse apportée, la teneur en azote inorganique disponible augmente dans le sol lorsque *Vicia villosa* est fauchée et conséquemment, il y a augmentation en grains et biomasse du sorgho. Ces valeurs obtenues de Kodek et de Zouana à 90 JAS se rapprochent peu de celles obtenues sur la luzerne dans l'oasis d'El Goléa en Algérie : la quantité totale d'azote fixé en 192 jours est de 391,44 kg/Ha pour la variété locale et respectivement de 416,98kg/Ha ; 484,4 kg/Ha pour les variétés introduites (Arabie Saoudite et Temacine). La période du cycle (90 et 192 jours), les conditions pédoclimatiques et la variété de la plante peuvent justifier cette différence. Pour ce qui est de l'apport en azote du sol, la quantité d'azote restitué par la variété locale est plus importante avec 102,7 kg/ha dépassant les variétés introduites : Arabie Saoudite avec 88,7 kg/Ha et Temacine avec 84,7 kg/Ha.

Par contre, le haricot, *Phaseolus vulgaris,* très répandu en Amérique latine, était un très mauvais fixateur d'azote, avec des taux de 30 à 60 kg N/Ha au Mexique, au Brésil et au Kenya, tandis que la fève à cheval *(Vicia faba, var. equina)* était un excellent fixateur, avec 150 à 300 kg N/Ha en Egypte et en Autriche [19]. Les gains de rendements en maïs par rapport au témoin non fertilisé N0 sont observés aussi bien en association (CM) : soit 14,08% à Kodek et soit 13,89 % à Zouana ; que sur *mulch* (C) : soit 38,03 % à Kodek et soit 34,72 % à Zouana. De même au Canada, il a été observé une augmentation de rendement du maïs due au précédent d'une légumineuse fourragère, la luzerne ; ceci entre 15 à 37 % en première année de culture et entre 4 à 6 % en deuxième année [20]. Les rendements de maïs obtenus à Kodek et Zouana en culture pluviale, ne diffèrent que peu des rendements obtenus en maïsculture irriguée, dans la localité de Di au Burkina Faso, soit entre 2000 et 4500 kg/Ha, avec une moyenne de 3450 kg/Ha en grain et entre 4000 et 6000 kg/Ha de paille [21]. En plus, les SCV assurent un contrôle satisfaisant des mauvaises herbes, notamment du *Striga sp*. Ce qui contribue à accroître la productivité. Toutefois, la moyenne des rendements obtenus s'écartent du potentiel de la variété du maïs CMS 9015 qui est de 5000 kg/ha. Ce qui s'explique par le déséquilibre en éléments nutritifs majeurs (N, K_2O et P_2O_5), où seul l'azote a été apporté comme fertilisant

dans la présente étude. Ce déséquilibre est justifié par la loi d'interaction ou loi du minimum où l'importance du rendement d'une récolte est déterminée par l'élément qui se trouve en plus faible quantité par rapport aux besoins de la culture. L'analyse du sol permet généralement de découvrir le facteur limitant. Cette loi d'interaction met en évidence l'interdépendance entre les différents éléments fertilisants et la nécessité d'atteindre une richesse suffisante du sol en tous éléments pour que le rendement optimum soit atteint. L'interaction est dite positive lorsque l'effet exercé par un ensemble de deux facteurs est supérieur à la somme des effets de ces facteurs agissant séparément. Ainsi, la satisfaction des besoins en potassium assure une plus grande efficacité des apports d'azote. L'interaction entre le phosphore et l'azote est également positive. Les bonnes performances en SCV ont été également observées en 2015 sur le rendement moyen du *Sorghum* de 2002 à 2012 sur le site expérimental de Zouana [22]. Ceci avec trois niveaux de fertilisations F1: 100 kg/Ha NPK et 25 kg/Ha Urée ; F2: 200 kg/Ha NPK et 50 kg/Ha d'Urée et F3: 300 kg kg/Ha NPK et 100 kg/Ha d'Urée, appliqués à trois systèmes de culture (semis direct SD, labour L et SCV) sur 9 parcelles expérimentales. Et les rendements en *Sorghum* ainsi obtenus sont 1239, 863 et 960 kg/Ha en SCV, SD et L respectivement à F1, 1658, 1139 et 1192 kg/Ha en SCV, SD et L respectivement à F2 et 2270, 2138 et 1780 kg/Ha en SCV, SD et L respectivement à F3.

De même, les essais de maïs conduits de 2002 à 2011 sur le site expérimental de Pintchoumba avec une fertilisation de 100 kg/Ha de NPK et 100 kg/Ha d'urée ont donné des rendements satisfaisants sur le *mulch* de *Crotalaria retusa* : 3800 kg/Ha en semis direct ; 3800 kg/Ha sur labour ; 4200 kg/Ha sur mulch de *Brachiaria ruziziensis* et 4700 kg/Ha sur *mulch* de *Crotalaria retusa* [23]. En diffusion en milieu rural au Nord-Cameroun, les SCV ont permis d'avoir un gain de 19,43 % en rendements du coton paillé par rapport au coton conventionnel [24]. Et la performance des SCV est d'autant plus expressive lorsque l'association est faite avec les légumineuses. Ce qui permet de récupérer et de revaloriser les parcelles rendues incultes à la production agricole du fait d'une dégradation sévère comme les sols *hardés*. Ces atouts sont la réponse des sols aux effets d'amélioration liés à la matière organique, avec entre autres l'amélioration du pouvoir de rétention en eau, la matière organique pouvant retenir 100 fois son poids en eau et limitant à ce titre le stress hydrique dans des zones à faible pluviométrie. La formation du complexe argilo-humique limite en outre la perte des minéraux par infiltration ou ruissellement. On a aussi la création d'un milieu favorable à l'activité biologique des microorganismes (verres de terre, termites, bactéries, etc.) qui assurent l'humification et la minéralisation de la matière organique pour fournir les nutriments aux plantes ; et la hausse de la teneur en humus qui contribue à la stabilité structurale.

On observe toutefois une régression des rendements moyens à Zouana à partir de l'apport de N3 (240 kg N/Ha), soit de 3659, 53 kg/Ha à 3456,26 kg/Ha en apport N4 (320 kg/Ha), soit une baisse de 203,27 kg/Ha, représentant 5,88 % ; bien que ces données de rendements ne soient pas statistiquement différentes au seuil de signification de 5 %. Cette baisse traduit un effet de phytotoxicité due à la surdose en azote. Et la critique de la loi de Liebig ou loi du minimum, d'interaction ou loi du facteur limitant conforte cette analyse. Justus von Liebig, chimiste allemand, par son travail de chercheur mais aussi d'enseignant, fit des contributions majeures à la chimie organique et à l'agronomie. Sa loi qui énonce que le poids de la récolte dépend uniquement du facteur nutritif le moins représenté dans le sol, c'est-à-dire le facteur limitant peut donc être controversée, étant entendu qu'elle n'envisage pas la possibilité de la toxicité ou de l'excès d'un élément et attache au facteur limitant une importance exclusive sans tenir compte des autres facteurs. Ce qui fait que d'autres travaux basés sur l'importance des éléments minéraux sont venus compléter la loi du minimum, en l'occurrence la loi de l'Optimum de Georg Liebscher, qui stipule que : « les plantes utilisent l'élément de croissance présent en quantité minimale pour leur développement d'une façon d'autant plus efficace que les autres éléments de croissance sont présents dans des proportions optimales ». UNIFA (2005) note également cette tendance à la baisse de rendement due à un apport excessif d'azote à travers le bilan

des besoins et des fournitures en azote d'une culture. Au fur et à mesure que les fournitures d'azote augmentent, le rendement et la marge brute augmentent, jusqu'à atteindre l'équilibre, correspondant à l'optimum économique, c'est-à-dire l'équilibre entre les besoins en azote nécessaires pour le rendement et les fournitures d'azote. Si les fournitures sont supérieures à ces besoins, l'aiguille penche vers la droite et les rendements diminuent, la marge brute aussi. Les manifestations de carence azotée chez le maïs varient selon l'intensité du déficit [20]. En général, on observe un ralentissement de la croissance, une diminution des dimensions des feuilles, un amincissement des tiges et une réduction du nombre de tiges. Les plantes carencées prennent progressivement une coloration vert-pâle, puis jaune. Le développement de cette chlorose s'effectue des vieux organes aux tissus plus jeunes, dans le sens de la translocation de l'azote. La chlorose des plantes carencées en azote est due au blocage de la synthèse de la chlorophylle. En fait, l'absence de la synthèse des protéines est l'un des effets biochimiques majeurs d'une carence d'azote. Et cette carence se traduit par la baisse de productivité avec une activité photosynthétique faible et un impact négatif sur l'élaboration des composantes du rendement. En effet, la dissipation de l'énergie lumineuse sous forme de chaleur est accrue et la portion de l'énergie radiative utilisée par la photosynthèse est réduite. Par ailleurs, en fonction des conditions environnementales et des pratiques culturales, le bilan azote du sol peut être négatif suite à une culture de légumineuses. Par exemple, l'incorporation de résidus de légumineuses après une récolte des graines ou après plusieurs coupes retourne au sol des quantités d'azote limitées. En effet, les résidus de légumineuses ne contribuent à l'azote du sol que si la proportion de l'azote dérivée de la fixation pour les plantes entières est plus élevée que l'indice de récolte pour l'azote.

Il est aussi possible que l'azote provenant de la légumineuse en décomposition ne soit pas disponible au moment où les besoins de la culture subséquente sont élevés. Cet azote ne contribue donc pas nécessairement à la nutrition de la culture suivant directement la légumineuse. L'apport d'azote au sol par les légumineuses n'expliquerait pas en totalité les rendements élevés des cultures subséquentes. D'autres facteurs tels que la rotation, non liés à l'apport d'azote au sol, expliquent aussi les rendements supérieurs des céréales subséquentes aux légumineuses [25]. Ces effets de rotation incluent : l'amélioration des propriétés physiques du sol, l'élimination de substances phytotoxiques du sol, l'addition de promoteurs de croissance et la réaction de l'incidence d'insectes nuisibles et des maladies. Par ailleurs, pour compenser un déficit réel d'éléments minéraux, une fertilisation minérale raisonnée peut être envisagée, bien que l'utilisation des engrais minéraux à dose assez conséquente et de façon répétée puisse poser moins de problème de pollution des sols que celui de dégradation de leur statut organique et à la longue la dégradation de leur fertilité [26]. Pour pallier à cela, les agronomes ont recommandé dans les années 1980-1990 d'apporter 5 T/Ha de matière sèche de fumure organique tous les deux ans [27] ou 6 T/Ha tous les 3 ans [28] pour les systèmes de culture continue sans jachère et sans autres pratiques d'entretien de la matière organique du sol. D'autres techniques d'entretien du statut organique des sols cultivés existent et on a entre autres l'agroforesterie intensive, le mulch ou le paillage en surface.

5. Conclusion

La présente étude permet de montrer la contribution de la légumineuse *Crotalaria juncea* dans la réhabilitation agroécologique des sols dégradés ; ceci à travers la réponse satisfaisante du maïs aux SCV comparés au système classique dans les sites expérimentaux de Kodek et de Zouana. Les plants à nodosités (85 % à Kodek et 75 % à Zouana) permettent grâce à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique de le rendre disponible pour la nutrition de la culture. La valeur moyenne de remplacement en azote pour les exsudats racinaires issus de la modalité crotalaire-maïs (CM) est de 40 kg N/Ha et 38 kg N/Ha ; et celle obtenue sur le mulch de la crotalaire (C) après minéralisation partielle est de 196 kg N/Ha et 184 kg N/Ha

respectivement à Kodek et à Zouana. La symbiose *Rhizobium-Crotalaria* permet donc de fixer en moyenne 266,67 kg N/Ha/an à Kodek et 253,33 à Zouana et optimise de même la gestion du capital sol dans le but de réduire l'utilisation d'engrais minéraux azotés : *Crotalaria juncea* est donc une plante améliorante de la fertilité des sols. Ce qui, bien évidemment, a permis d'obtenir des gains de rendements en maïs par rapport au témoin non fertilisé N0 aussi bien en association (CM) : 2638,63 contre 2312,87 kg/Ha, soit 14,08 % à Kodek et 2778,53 contre 2439,69 kg/Ha, soit 13,89 % à Zouana ; que sur *mulch* (C) : 3192,42 contre 2312,87 kg/Ha, soit 38,03 % à Kodek et 3286,80 contre 2439,69 kg/Ha, soit 34,72 % à Zouana. L'économie d'engrais azotés obtenu de l'usage de la crotalaire, permet de baisser le coût de production d'une culture céréalière comme le maïs, en l'alternant avec une culture de légumineuse et en plus, permet de protéger l'environnement en limitant la pollution des sols par les nitrites. L'agriculture de conservation offre donc au-delà de l'innovation agronomique et de ses effets protecteurs sur l'environnement, tous les éléments d'une véritable révolution vers une agriculture durable. Au vu de certaines contraintes limitant la promotion des SCV (vaine pâture, feux de brousse, usages concurrentiels de l'espace, etc.), il est nécessaire de développer la concertation entre les différents acteurs (autorités traditionnelles et administratives, élus, techniciens et exploitants des ressources) ; ceci, pour une productivité agricole satisfaisante, durable et protectrice de l'environnement.

Références

[1] - Millennium ecosystem Assessment, Ecosystems and human well-being : *Synthesis*, Island press Washington, DC, (2005)

[2] - M. LEMENIH, Effects of land use changes on soil quality and native flora degradation and restoration in the highlands of Ethiopia. Implications for sustainable land management, PhD thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, (2014)

[3] - R. LAL, G. F. HALL and F. P. MILLER, *Soil degradation: I. Basic processes*, *Land Degradation et Development.*, (1989) 51 - 69 p.

[4] - A. CITEAU BISPO, M. BARDY et D. KING, Gestion durable des sols, Editions Quae, Collection Savoir-faire, Versailles Cedex, France, (2008) 320 p.

[5] - ONU, Adopton des 17 Objectifs de développement durable du Programme de développement durable à l'horizon 2030, 25 septembre 2015, Sommet de New-York, USA, (2015)

[6] - M. RAUNET et K. NAUDIN, Lutte contre la désertification : l'apport d'une agriculture en semis direct sur couverture végétale permanente (SCV). Les dossiers thématiques du CSFD N°4, Septembre 2006, CSFD/Agropolis, Montpellier, France, (2006) 40 p.

[7] - A. MULUNEH, B. BIAZIN STROOSNIJDER, L. W. BEWKETAND and S. KEESSTRA, Impact of predicted changes in rainfall and atmospheric carbon dioxide on maize and wheat yields in the Central Rift Valley of Ethiopia, Region Environment Change, 15, 1105–1119, doi:10.1007/s10113-014-0685-x, (2014)

[8] - P. BRABANT et M. GAVAUD, *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun*, Collection Notice Explicative 103, MESIRES-IRA Yaoundé, ORSTOM, (1985), 258 p.

[9] - D. TSOZUÉ, B. R. HAIWE, J. LOULEO, J. P. NGHONDA, Local Initiatives of Land Rehabilitation in the Sudano-Sahelian Region : Case of Hardé Soils in the Far North Region of Cameroon*, Journal of Soil Science, Scientific research*, (2014) 10 p.

[10] - T. P. HINIMBIO, Effets de couverture des sols arables par une bioressource (Brachiaria ruziziensis) sur la restauration de leur fertilité au Nord-Cameroun, Mémoire de Master of Science en Chimie de l'environnement et des ressources naturelles, Université de Maroua, Cameroun, (2014) 108 p.

[11] - K. NAUDIN, You can't eat your mulch and have it too, Cropping system design and trade-offs around biomass use for Conservation Agriculture in Cameroon and Madagascar, Thesis Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of doctor at Wageningen University, (2012) 220 p.
[12] - C. REIJ, I. SCOONES, C. TOULMIN, Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique, CTA, CDCS, Karthala, (1996) 360 p.
[13] - J. P. MULLER, *Carte des sols du Cameroun*, IRA, Station agronomique de Nkolbisson, Laboratoire de Pédologie, Yaoundé, Cameroun, (1979) 2 p.
[14] - MEKEM, Analyses et impacts des modes de gestion des terres dégradées sur les rendements agricoles et la fertilité des sols en zone tropicale sèche *: Cas de Zouana,* Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur de conception en Sciences Environnementales, Option Désertification et ressources naturelles, ISS, Université de Maroua, Cameroun, (2013) 62 p.
[15] - BRINK et ACHIGAN-DAKO, *Plantes à fibres, Ressources végétales de l'Afrique Tropicale*, Vol. 16, Fondation PROTA, Wageningen, (2005) 659 p.
[16] - CIRAD-GRET, *Mémento de l'Agronome*, Ministère Français des Affaires Étrangères, Paris, (2002) 448 - 477
[17] - N. KRISHNA et B. OUMAROU, Systèmes de culture sur couverture végétale, Synthèse des résultats, campagne 2003, SODECOTON, CIRAD, (2004) 105 p.
[18] - SOLAG, *Légumineuses et azote : comment ça marche* ? Bulletin Sol et Agronomie des Chambres d'agriculture des Pays de la Loire, N° 06 du 05 Septembre 2016, (2016) 2 p.
[19] - S. K. A. DANSO et D. L. ESKEW, Comment renforcer la fixation biologique de l'azote, AIEA Bulletin, Vol. 26, N° 2 (1985) 5 p.
[20] - J. P. MVONDO AWONO, Fertilisation azotée du maïs-grain (Zea mays L.) en rotation avec une luzerne non dormante (Medicago sativa L. var. Nitro), Thèse présentée pour l'obtention du grade de Docteur PhD, à la Faculté des études Supérieures de l'Université Laval, Québec, Canada, (1997) 235 p.
[21] - P. DUGUE, Étude d'évaluation environnementale et du développement de systèmes de production durables dans le cadre des projets de soutien à la production vivrière au mali et au Burkina Faso, FARM, CIRAD, Paris, France, (2009) 98 p.
[22] - D. TSOZUÉ, J. P. NGHONDA, D. L. MEKEM, Impact of land management system on crop yields and soil fertility in Cameroon, Solid Earth, (2015) 15 p.
[23] - A. ABOU ABBA, Promotion des actions de gestion des ressources agro-sylvo-pastorales au niveau des terroirs du Nord-Cameroun, Module de formation au Programme ASGIRAP, Garoua, Cameroun, (2017) 35 p.
[24] - T. P. HINIMBIO, Agroécologie et gestion durable des sols en Afrique soudano-sahélienne, L'harmattan, Paris, France, (2016) 222 p.
[25] - G. H. HEICHEL, *Legumes as a source of nitrogen in convention tillage systems.* Pages 29-35 dans : The role of legumes in conservation tillage systems. Soil Conservation society of America, Ankeny, Iowa, (1987)
[26] - R. BERTRAND, J. GIGOU, *La fertilité des sols tropicaux*. Edition Maisonneuve et Larose, Collection Le technicien d'agriculture tropicale, (2000) 397 p.
[27] - M. P. SEDOGO, Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture. Incidences des modes de gestion sur la fertilité, Thèse de doctorat en sciences. Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1993) 333 p.
[28] - F. BELANGER, Engrais et amendements organiques. Pages 161-176, *in* Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Quebec, (1996) 257 p.