



HAL
open science

Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G.&E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun

Taïda Pierre Hinimbio

► To cite this version:

Taïda Pierre Hinimbio. Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G.&E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun. Agronomie. Université de Maroua (Cameroun), 2019. Français. NNT : . tel-02305183

HAL Id: tel-02305183

<https://theses.hal.science/tel-02305183>

Submitted on 3 Oct 2019

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

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

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail-Patrie

Ministère de l'Enseignement Supérieur

UNIVERSITÉ DE MAROUA

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
POLYTECHNIQUE

ÉCOLE DOCTORALE

UNITE DE FORMATION DOCTORALE
EN SCIENCES DE L'INGENIEUR



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

Ministry of Higher Education

THE UNIVERSITY OF MAROUA

NATIONAL ADVANCED SCHOOL OF
ENGINEERING

DOCTORATE SCHOOL

ENGINEERING SCIENCES
TRAINING UNIT

Réhabilitation de la fertilité des sols par usage des bioressources (*Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* G.&E.) en zone cotonnière de l'Extrême-Nord, Cameroun

Thèse présentée et soutenue le 07 Juin 2019 pour l'obtention du grade de Docteur/PhD en Sciences de l'Ingénieur
Option : Agronomie et Biologie Appliquée

Par :

HINIMBIO TAIDA PIERRE

Ingénieur Agronome

Master of Science en Chimie de l'environnement et des ressources naturelles

Matricule : 14A679S

Jury :

Danwé Raïdandi	<i>Professeur, Université de Maroua</i>	Président
Ngakou Albert	<i>Professeur, Université de Ngaoundéré</i>	Rapporteur
Abdou Bouba Armand	<i>Maître de Conférences, Université de Maroua</i>	Rapporteur
Djouldé Darman Roger	<i>Maître de Conférences, Université de Maroua</i>	Examinateur
Madi Ali	<i>Maître de Conférences, Université de Maroua</i>	Directeur de thèse
Mvondo Awono J. Pierre	<i>Maître de Conférences, Université de Ngaoundéré</i>	Co-Directeur de thèse

Dédicace

À la famille Taïda

À la famille Djodjo Kampété

Pour toutes les attentions, tout le soutien et l'agréable sacrifice patiemment consenti.

Remerciements

La présente thèse de Doctorat/PhD en Agronomie et Biologie Appliquée, fruit d'un travail patiemment conduit, n'a pu être effective qu'avec l'appréciable contribution de nombreuses personnes. Aussi, voudrais-je sincèrement remercier :

- Pr Madi Ali, Enseignant à l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Maroua, qui a bien voulu accepter l'encadrement de ce travail et qui l'a soigneusement et méthodiquement dirigé ;

- Pr Mvondo Awono Jean Pierre, Doyen de la Faculté des Sciences, à l'Université de Ngaoundéré, qui a codirigé cette thèse avec dextérité et toute la rigueur scientifique ;

- Pr Mvondo Zé Antoine, Doyen de la Faculté d'Agronomie et des Sciences agricoles (FASA) et Responsable du laboratoire de chimie du sol et de l'environnement de l'Université de Dschang et ses collaborateurs, pour l'encadrement et l'analyse des échantillons des sols ;

- Pr Danwé Raïdandi, Pr Loura Benoît, Pr Abdou Bouba Armand, Pr Djouldé D. Roger, Pr Kosma Philippe, Pr Kossoumna Liba'a, Pr Goudoum Augustin, Pr Ngakou Albert, Dr Tsozué Désiré, Dr Froumsia et tout le staff pédagogique et administratif de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique de l'Université de Maroua pour leur disponibilité, leurs apports scientifiques et la documentation offerte ;

- Mon regretté père Taïhla Silas Tchenemou ; ma mère Mbanga Marthe Ndidinding ; mes frères et sœurs aînés Hon. Bouba Jean Taïda, Haman Djoda Isaac, regrettée Dando Elisabeth, Mokkaïga Taïda Pauline ; mes regrettés oncles Alioum Hinimbio, Bouba Koïna et Ngaya Waram ; et ma belle-sœur Rebecca Bouba pour le soutien légendaire et multiforme ; puissent-ils être comblés au-delà de la dimension de leurs efforts ;

- Mon épouse, mes enfants et mes neveux pour les attentions et les affections ;

- Messieurs Amadou Vamoulké, Mounouna Foutsou, Mbaïrobé Gabriel, Mohamadou Bayero, Jean-Charles Sigrist, Klassou Célestin, Kalbassou Daniel, Abdoulaye Abou Abba, Ibrahim Ngamié, Tsamba Frédéric, Hamadou Nouhou, Adoum Yaouba et Sadou Fernand pour le précieux encadrement et les valeurs humaines diffusées ;

- Mes frères, amis et collègues de la SODECOTON Dr Dafogo Etienne, Ifogo Zolossou, Soussia Kampété, Dr Oumarou Balarabé, Oumarou Bouba, Oumaraïni, Boubakari Bounou, Seibou B. Alexis, Dr Olina B.J.P., Laoumaye Michel, Lamma Jacques, Ramlina Patrice, Ndeguena René, Voudina Nicodème, Lamtamou Dieudonné, Oumarou Youssoufa, Boubakari Mamoudou, Hassan Raphaël, Daoudou, Adoum Oumarou et Alifa M. pour les encouragements et les aimables conseils sur le chemin de cette thèse ;

- M. Godjé de Zouana et M. Tchoukdourou de Kodek pour le suivi au quotidien des tests expérimentaux *in situ* et l'ensemble des agriculteurs rencontrés pour leur accueil et l'intérêt manifesté pour cette thématique ;

Que tous ceux qui, non cités ici, ont contribué d'une façon ou d'une autre à la construction de cette thèse puissent également trouver là l'expression de ma cordiale gratitude.

Résumé

L'abandon accru des sols agricoles observé dans le monde dû à l'érosion et à la perte de leur fertilité reste l'un des défis majeurs de l'humanité en vue de résoudre le problème de baisse des rendements des cultures et de l'insécurité alimentaire. Le présent travail est mené avec l'objectif de contribuer à la réhabilitation agroécologique de la fertilité des sols dégradés à travers l'utilisation du système de culture sur couverture végétale (SCV). Pour y parvenir, des essais ont été conduits en zone cotonnière de l'Extrême-Nord du Cameroun (Kodek et Zouana) en bloc randomisé de Fischer à 7 traitements et 4 répétitions avec la bioressource *Crotalaria juncea* L. sous maïs et en milieu paysan avec *Brachiaria ruziziensis* sous coton impliquant 50 agriculteurs. Les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols ont fait l'objet d'analyse, tout comme les paramètres de production de la crotalaire, du maïs et du coton, couplés à une évaluation économique. L'analyse des sols montre que les 2 sites sont sablo-limoneux à 20 cm du sol et la proportion des éléments grossiers est faible à Kodek (12,90%) mais très importante à Zouana (42,03%). Les sols à *Crotalaria juncea* connaissent une hausse de la matière organique mais n'atteignent pas la moitié de l'idéal de 5% (1,38 à 2,09% à Kodek et 1,67 à 2,24% à Zouana) et l'activité biologique y est plus intensive. Le rapport C/N varie de 13,30 à 30,31 à Kodek et de 16,00 à 24,75 à Zouana. La CEC à pH7 varie de 12 à 13,3 méq/100 g à Kodek et de 7,6 à 12,18 méq/100g à Zouana. Il ressort aussi de cette analyse que seuls 85% de plants de crotalaire 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). On observe par ailleurs que cette crotalaire, avec une taille moyenne de 1,81 et 2,41 m ; une densité moyenne de 165503 et 170601 plants/ha ; produit en moyenne sans fertilisation une biomasse totale sèche de 19,03 et 15,74 tonnes/ha respectivement à Kodek et à Zouana. La valeur moyenne de remplacement en fertilisant azoté des exsudats du traitement crotalaire-maïs (CM) est de 40 et 38 kg N/ha ; et celle de la minéralisation partielle du mulch de la crotalaire (C) est de 196 et 184 kg N/ha respectivement à Kodek et Zouana. Des gains de rendements en SCV sont obtenus en maïs par rapport au témoin non fertilisé (N0) : en association (CM) 14,08% à Kodek (2638,63 contre 2312,87 kg/ha) et 13,89% à Zouana (2778,53 contre 2439,69 kg/ha) ; mais aussi sur mulch (C) 38,03% à Kodek (3192,42 contre 2312,87 kg/ha) et 34,72% à Zouana (3286,80 contre 2439,69 kg/ha). En milieu paysan, un gain de rendement en coton sur mulch de *Brachiaria ruziziensis* de 19,43% soit 1506,20 contre 1261,44 kg/ha, a été obtenu par rapport au témoin labouré. En outre, il y a une réduction du temps de travail et du coût de production en SCV et donc une hausse de la valeur ajoutée nette par rapport au témoin. Les espèces *Crotalaria juncea* et *Brachiaria ruziziensis* contribuent donc à réhabiliter la fertilité des sols dégradés et à accroître la productivité agricole. Toutefois, l'appui des pouvoirs publics et la concertation entre les acteurs sur la conservation du sol et de la biomasse permettront de vulgariser davantage ce système productif et protecteur de l'environnement.

Mots clés : Réhabilitation agroécologique du sol, *Crotalaria juncea*, *Brachiaria ruziziensis*, maïs, coton, Extrême-Nord du Cameroun.

Abstract

One of the major challenge of the international community is to solve the problem of crop yield loss and food insecurity, attributed to the abandon of agricultural soils due to erosion and loss of their fertility. The present work is involved with objective to contribute to agroecological rehabilitation of soil fertility through the direct seeding mulch-based cropping system (DMC). To conduct this work, the experimental plots were conducted in cotton zone of Far-North of Cameroon (Kodek and Zouana), on randomized Fischer plots design with 7 modalities and 4 repetitions with bioresource *Crotalaria juncea* under maize; and in real production milieu with *Brachiaria ruziziensis* under cotton, concerning 50 farmers in Far-North Cameroon. The physical, chemical and biological soil samples' characteristics were analyzed, with also the production parameters of *Crotalaria*, maize and cotton. The soil analysis shows that in the two experimental sites, soils are sandy-silt at 20 cm depth and the proportion of coarse soil elements is weak in Kodek (12.90%) but important in Zouana (42.03%). There is increase in organic matter content on soil covered by *Crotalaria juncea* but less than the ideal content 5% (1.38 to 2.09% in Kodek and 1.67 to 2.24% in Zouana) and biological activity is more intensive; structural stability, water and minerals retention capacity are also improved. The C/N ratio varies from 13.30 to 30.31 in Kodek and from 16.00 to 24.75 in Zouana. The CEC at pH7 varies from 9.12 to 13.3 meq/100 g in Kodek and from 7.6 to 12.18 meq/100g in Zouana. There is also fined 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 height of *Crotalaria juncea*, is 1.81 and 2.41 m; the mean plant density is 165503 and 170601 plants/ha; and total dry biomass is 19.03 and 15.74 tons/ha respectively in Kodek and Zouana. The nitrogen fertilizer replacement 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. The maize yield improvements are obtained on DMC compared to reference witness unfertilized plot (N0) both in association (CM) 14.08% (2638.63 against 2312.87 kg/ha) in Kodek and 13.89% (2778.53 against 2439.69 kg/ha) in Zouana; and on mulch (C): 38.03% (3192.42 against 2312.87 kg/ha) in Kodek and 34.72% (3286.80 against 2439.69 kg/ha) in Zouana. In the farmer's conditions, yield gain of cotton on *Brachiaria ruziziensis* in DMC is 19.43% compared to reference (1506.20 against 1261.44 kg/ha). Besides, there is reduction of work time and production cost in DMC and also, the improvement of net added value compared to witness. Hence, the DMC contribute to rehabilitate the degraded soil fertility and to ameliorate the crop yield. However, the public service support and the actor's consultation on soil and biomass conservation will enhance this productive and environment protective system.

Keywords: Soil agroecological rehabilitation, *Crotalaria juncea*, *Brachiaria ruziziensis*, maize, cotton, Far-North Cameroon.

Table des matières

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	v
Liste des Tableaux.....	viii
Liste des Figures.....	x
Abréviations, sigles et acronymes	xii
Introduction générale.....	1
Partie 1 : Concepts, théories et revue de la littérature	8
Chapitre 1 : Cadre conceptuel et théorique	9
1.1 Concept de sol agricole	9
1.2 Clarification conceptuelle de la fertilité du sol.....	11
1.3 Concept de dégradation des sols.....	14
1.4 Concept de réhabilitation agroécologique du sol	19
1.5 Concept et principes des SCV	25
1.6 Concept, principes et lois de la fertilisation agricole.....	28
1.7 Théories en gestion de la fertilité des sols.....	31
1.7.1 Théorie de la bio-rhexistase	32
1.7.2 Théorie de l'inadaptation des méthodes agricoles	33
1.7.3 Théorie de perturbation de l'équilibre d'un sol.....	34
1.7.4 Théorie de la gestion intégrée de la fertilité des sols.....	35
Chapitre 2 : Revue de la littérature.....	37
2.1 Composition, profil et propriétés d'un sol agricole.....	37
2.2 Types des sols au Nord-Cameroun.....	40
2.2.1 Sols peu évolués d'apport.....	42
2.2.2 Sols ferrugineux tropicaux	43
2.2.3 <i>Hardés</i>	46
2.2.4 Vertisols.....	51
2.2.5 Sols rouges tropicaux	54
2.3 Impacts de la dégradation des terres.....	55
2.4 Réhabilitation du sol par l'agriculture de conservation.....	59
2.4.1 Résilience de l'agroécologie.....	59

2.4.2 Amélioration du statut organique et minéral du sol	64
2.4.3 Bioressources de couverture du sol	67
2.4.3.1 Crotalaire	68
2.4.3.2 <i>Brachiaria ruziziensis</i>	74
2.4.4 Autres sources de la matière organique du sol	76
2.4.4.1 Fumier	76
2.4.4.2 Compost.....	78
2.4.4.3 Engrais vert.....	78
2.4.5 Humification et minéralisation de la matière organique	79
2.4.6 Formation du complexe argilo-humique	81
2.5 Fixation symbiotique de l'azote	82
2.5.1 Symbiotes et symbiose	83
2.5.2 Processus de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique	86
2.5.3 Facteurs de fixation de l'azote atmosphérique	90
2.5.4 Indicateurs de fixation d'azote	93
2.6 Valeur de remplacement en fertilisant azoté	95
2.7 Nutrition minérale des plantes.....	97
Partie 2 : Matériel et méthodes.....	103
Chapitre 3 : Caractérisation du milieu et dispositif expérimental	104
3.1 Caractérisation biophysique de Kodek et Zouana	104
3.2 Dispositif expérimental de l'étude.....	110
3.3 Matériel végétal et phytotechnie	112
3.3.1 <i>Crotalaria juncea</i> (Linné)	112
3.3.2 <i>Brachiaria ruziziensis</i> (Germain et Evrard)	114
3.3.3 Maïs et culture	114
3.3.4 Coton et culture	117
3.4 Urée et application.....	119
Chapitre 4 : Fixation symbiotique de l'azote et production agricole.....	121
4.1 Détermination du potentiel de fixation d'azote par la crotalaire	121
4.2 Evaluation de la production de la crotalaire, du maïs et du coton	122
4.2.1 Evaluation des paramètres culturels de la crotalaire	122
4.2.2 Production et évaluation des rendements du maïs.....	123
4.2.3 Production et évaluation des rendements du coton	127
4.2.4 Détermination de la valeur de remplacement en fertilisant azoté.....	128

4.3 Analyse et traitement des données	128
Partie 3 : Résultats et discussion	130
Chapitre 5 : Caractéristiques biophysiques des sites	131
5.1 Milieu biophysique de Kodek et de Zouana.....	131
5.2 Caractéristiques des sols à Zouana et à Kodek.....	135
5.2.1 Profil cultural.....	135
5.2.2 Activité biologique du sol	137
5.2.3 Structure des sols.....	140
5.2.4 Texture des sols.....	141
5.2.5 pH des sols.....	143
5.2.6 Teneur en matière organique	148
5.2.7 Cations et acidité échangeables	153
5.2.8 Capacité d'échange cationique	155
5.2.9 Phosphore assimilable	157
Chapitre 6 : Paramètres culturaux et rendements agricoles.....	158
6.1 Potentiel de fixation symbiotique de l'azote	158
6.2 Paramètres culturaux de la crotalaire	160
6.2.1 Densité des plants de crotalaire	160
6.2.2 Taille des plants de crotalaire	160
6.2.3 Biomasse des plants de crotalaire.....	162
6.3 Rendements comparés en maïs.....	166
6.4 Valeur de remplacement en fertilisant azoté	176
6.5 Rendements du coton sur mulch de <i>Brachiaria ruziziensis</i>	184
6.6 Apports économiques du SCV	188
Conclusion générale	194
Références bibliographiques	200
Annexes	218
Article publié relatif à la présente thèse	223

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Capacité d'échange de minéraux argileux et de matière organique	40
Tableau 2 : Comparaison entre <i>C. retusa</i> et <i>C. juncea</i> (PCS –ESA 2, 2010).....	70
Tableau 3 : Exemple de contenu minéral des végétaux (Bertrand et Gigou, 2000)	73
Tableau 4 : Richesse minérale des fumiers (méq/100g) (Pieri, 1989).....	77
Tableau 5 : Spécificité des <i>Rhizobium</i> avec les plantes hôtes (Bayle, 1994)	85
Tableau 6 : Eléments de prélèvement des sols à Kodek et Zouana	108
Tableau 7 : Dispositif expérimental mis en place.....	111
Tableau 8 : Quantités de minéraux (kg) pour produire 5000 kg/ha de maïs	115
Tableau 9 : Quantité d'urée appliquée (g/16 m ²).....	126
Tableau 10 : Pluviométrie (mm) de Kodek de 2005 à 2016.....	132
Tableau 11 : Pluviométrie (mm) de Kodek par décade en 2014, 2015 et 2016	132
Tableau 12 : Pluviométrie de Zouana de 2005 à 2016	134
Tableau 13 : Pluviométrie (mm) de Zouana par décade en 2014, 2015 et 2016	134
Tableau 14 : Proportions de la terre fine et des éléments grossiers.....	142
Tableau 15 : Fractions granulométriques et classe texturale (%) à 20 cm à Kodek...	142
Tableau 16 : Fractions granulométriques et classe texturale (%) à 20 cm à Zouana .	143
Tableau 17 : Réaction du sol à Kodek	143
Tableau 18 : Réaction du sol à Zouana.....	144
Tableau 19 : Matière organique à Kodek.....	149
Tableau 20 : Matière organique à Zouana	150
Tableau 21 : Cations échangeables en milliéquivalents/100g à Kodek.....	154
Tableau 22 : Cations échangeables en milliéquivalents/100g à Zouana	154
Tableau 23 : Acidité échangeable cationique en méq/100g à Kodek et à Zouana	154
Tableau 24 : Capacité d'échange cationique en méq/100g à Kodek	156
Tableau 25 : Capacité d'échange cationique en méq/100g à Zouana.....	156
Tableau 26 : Phosphore assimilable à Kodek et à Zouana : Bray II (mg/kg).....	157
Tableau 27 : Efficacité des nodosités de <i>Crotalaria juncea</i> à 60 JAS	159
Tableau 28 : Poquets/ha et plants/ha de crotalaire à Kodek et Zouana	160
Tableau 29 : Taille des plants de crotalaire à 90 JAS	161
Tableau 30 : Masse d'un plant de crotalaire (g) et teneur en eau à Kodek.....	162

Tableau 31 : Masse d'un plant de crotalaire (g) et teneur en eau à Zouana	162
Tableau 32 : Biomasse racinaire sèche de crotalaire produite à l'hectare.....	162
Tableau 33 : Biomasse aérienne sèche de crotalaire produite à l'hectare	163
Tableau 34 : Biomasse sèche totale de crotalaire produite à l'hectare	163
Tableau 35 : Productivité du maïs à Kodek.....	166
Tableau 36 : Productivité du maïs à Zouana.....	167
Tableau 37 : Récapitulatif des rendements du maïs à Kodek (kg/ha)	168
Tableau 38 : Récapitulatif des rendements du maïs à Zouana (kg/ha)	168
Tableau 39 : Rendements de maïs sur les sites selon le test de Duncan.....	168
Tableau 40 : Rendements coton SCV et témoin de 10 secteurs cotonniers.....	184
Tableau 41 : Estimation de la valeur ajoutée nette d'un ha de maïs.....	189
Tableau 42 : Estimation de la valeur ajoutée nette d'un ha de coton	190

Liste des Figures

Figure 1 : Modèle de dégradation des écosystèmes et voies de restauration	24
Figure 2 : Construction de sol.....	24
Figure 3 : Labour profond et destructeur du sol	33
Figure 4 : pH H ₂ O et pH KCl.....	39
Figure 5 : Esquisse pédologique de l’Afrique centrale et occidentale.....	41
Figure 6 : Grandes zones agroclimatiques de l’Afrique (ILTA, 1984)	41
Figure 7 : Vertisols de l’Extrême-Nord, Cameroun	52
Figure 8 : Plants de <i>Crotalaria juncea</i> (à gauche) et <i>Crotalaria retusa</i> (à droite).....	69
Figure 9 : Sole de <i>Brachiaria ruziziensis</i> à 60 JAS	75
Figure 10 : Schéma de la fixation symbiotique de l’azote (LP AGEPUR, 2015)	87
Figure 11 : Leghémoglobine de soja complexée avec le nicotinate	94
Figure 12 : Carte topographique de Kodek et environs (US Army, 1963).....	104
Figure 13 : Carte topographique de Zouana et environs (US Army, 1963)	104
Figure 14 : Localisation des sites de Kodek et de Zouana	111
Figure 15 : Semences de <i>Crotalaria juncea</i>	113
Figure 16 : Association <i>Crotalaria</i> -maïs en cours de cycle à Zouana	113
Figure 17 : Semences de <i>Brachiaria ruziziensis</i>	114
Figure 18 : Flore herbacée à droite contrôlée par le glyphosate.....	116
Figure 19 : Semences du maïs utilisé (CMS 9015)	117
Figure 20 : Semences de coton vêtues (à gauche) et délintées (à droite)	119
Figure 21 : Nodosité efficace de <i>Crotalaria juncea</i> à Kodek.....	121
Figure 22 : Nodosité inefficace de <i>Crotalaria juncea</i> à Kodek.....	122
Figure 23 : Biomasse de <i>Crotalaria juncea</i> sur le sol de Zouana	124
Figure 24 : Site expérimental de Zouana	133
Figure 25 : Réseau hydrographique et isohyètes au Nord-Cameroun	135
Figure 26 : Profil cultural sur sol témoin à Zouana	135
Figure 27 : Mélange restaurateur <i>Brachiaria-Crotalaria</i> à 90 JAS à Zouana.....	136
Figure 28 : Ver de terre sur sol SCV à Zouana.....	138
Figure 29 : Activité des termites sur mulch de crotalaire à Zouana	138
Figure 30 : Vitesse d’infiltration d’eau sur labour et sur SCV (Boli, 1996)	140

Figure 31 : Disponibilité des éléments nutritifs des plantes selon le pH.....	144
Figure 32 : Plants de crotalaire à 90 JAS à Kodek	161
Figure 33 : Décapage du sol dû à l'érosion hydrique	164
Figure 34 : Développement remarquable de la crotalaire sur un <i>hardé</i>	164
Figure 35 : Sol à mulch bien humide (à gauche) et sol sec (à droite).....	170
Figure 36 : Maïs sur mulch végétal à Zouana.....	171
Figure 37 : Maïs sur mulch plastique au Centre Songhaï, Porto Novo	171
Figure 38 : Vertisols aménagés et valorisés avec le maïs, le riz et le coton.....	172
Figure 39 : Parcelle de sorgho envahie par <i>Striga hermonthica</i>	173
Figure 40 : Sol improductif à Zouana.....	174
Figure 41 : Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Kodek	177
Figure 42 : Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Zouana	180
Figure 43 : Loi de Mitscherlich ou loi de rendements décroissants	181
Figure 44 : Bilan des besoins et apports en azote d'une plante (UNIFA, 2005)	182
Figure 45 : Effet de maîtrise de l'enherbement par les SCV sur coton	186
Figure 46 : Parcelle SCV en coton abandonnée (Hinimbio, 2014)	188
Figure 47 : Variation de la dose d'engrais chimiques en SCV ou non	192

Abréviations, sigles et acronymes

AABNF : *African Association for Biological Nitrogen Fixation*

ACTA : Association de coordination technique agricole

AEE : Agence européenne pour l'environnement

AFD : Alliance Française de Développement

AFES : Association française pour l'étude du sol.

AGRIDAPE : Agriculture durable à faibles apports externes

ANOVA : Analyse des variances

APAD : Association pour une agriculture durable

ARA : Activité réductrice d'acétylène

Biovar : *Biological variety*

BUCREP : Bureau Central des Recensements et des Études de Population

CAH : Complexe argilo-humique

CEC : Capacité d'échange cationique

CEDC : Centre d'Etude de l'Environnement et du Développement au Cameroun

CEMAGREF : Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts

CFDT : Compagnie Française de Développement des Fibres Textiles

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CIRAD-CA : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Département des Cultures Annuelles

CIRAD-URPA : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Unité de Recherche en Prospective et Politiques Agricoles

CMS : *Cameroon Maize Selection*

CSE : Cellule de Suivi-Evaluation de la SODECOTON

CSFD : Comité Scientifique Français de la Désertification

DGS : Division de Gestion des Sols de la SODECOTON

DJA : Dose journalière admissible

DL 50 : Dose létale 50

DMC : *Direct seeding mulch-based cropping system*

DPGT : Projet de Développement Paysannal et de Gestion de Terroirs

DSCE : Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi

DSRP : Document de Stratégie pour la Réduction de la Pauvreté

ECAM : Enquête Camerounaise auprès des ménages

ENSAM : Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier

ESA : Projet Eau-Sol-Arbre

FAO : *Food and Agriculture Organization*

FARM : Fondation pour l'Agriculture et la Ruralité dans le Monde

FASA : Faculté d'Agronomie et des Sciences Agricoles

FLDACS: *Florida Department of Agriculture and Consumer Services*

GCES : Gestion Conservatoire de l'Eau et de la Fertilité des Sols

GERES : Groupe énergies renouvelables, environnement et solidarités

GPS : *Global Positioning System*

GRET : Groupe de Recherche et d'Echanges Technologiques

IFAS : *Institute of Food and Agricultural Sciences, Florida*

IFPRI : *International Food Policy Research Institute*

INRA : Institut National de Recherche Agronomique

INS : Institut National de la Statistique

IRA : Institut de la Recherche Agronomique

IRAD : Institut de Recherche Agricole pour le Développement

ISRIC : *International soil reference and information centre*

JAS : Jours après semis

LABASCE : Laboratoire d'analyse des sols et de chimie de l'environnement

LP AGEPUR : Licence professionnelle en Aménagement et Gestion Écologiques des Paysages URbains

méq : milliéquivalent

MS : Matière sèche

NewCROP : *New Crops Resource Online Program*

NRCS : *Natural resources Conservation Service*

ODD : Objectifs de développement durable

OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMS : Organisation Mondiale de la santé
ONU : Organisation des Nations Unies
ORSTOM : Office Français de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
PCS-ESA 2 : Projet de Conservation des Sols au Nord-Cameroun, Eau-Sol-Arbre, 2^{ème}
phase
PhD : *Philosophiæ or Philosophy Doctor*
ppm : partie pour un million, aussi équivalent à mg/kg
PPTE : Pays pauvres très endettés
PROTA : *Plant resources of Tropical Africa*
RITA : Réseau d'innovation et de transfert agricole
SCV : Système de culture sur couverture végétale
SODECOTON : Société de Développement du Coton du Cameroun
sp : saison de pluie
SSE : Service de Suivi-Evaluation de la SODECOTON
ST : *Short ton*, 1ST = 2000 lb = 907,18474 kg
UE : Union Européenne
UF : Unité fertilisante
UICN : Union Internationale pour la conservation de la nature
UMR : Unité Mixte de Recherche
UNIFA : Union des Industries de la Fertilisation
USA : *United States of America*
USDA : *United States Department of Agriculture*
VAN : Valeur ajoutée nette
VRFA : Valeur de remplacement en fertilisant azoté
WDG : *Water dispersible granules*
WS : *Water dispersible powder for slurry seed treatment* ou poudre mouillable pour
traitement humide des semences.

Introduction générale

La zone soudano-sahélienne d’Afrique subit comme la plupart des autres zones du monde, la dégradation de ses ressources naturelles notamment les sols agricoles. Cette dégradation émerge comme l’un des problèmes majeurs de l’humanité (*Millenium ecosystem Assessment*, 2005) et est considérée comme un risque mondial car affecte la productivité des écosystèmes qu’ils soient agricoles, pastoraux ou forestiers (Pimentel *et al.*, 1995; Pimentel, 2006; Perkins *et al.*, 2013; Lemenih *et al.*, 2014; Van Leeuwen *et al.*, 2015). Les sols agricoles constituent l’une des ressources les plus menacées, notamment en raison de l’impact de l’activité humaine sur leur dynamique (Lal *et al.*, 1989). APAD (2017) indique que le sol est un patrimoine en danger à cause de la pollution, de l’érosion, de la compaction, de l’épuisement, de la salinisation et de l’artificialisation.

Gabathuler *et al.* (2009) observent que la sécheresse, la désertification et la dégradation des terres affectaient plus de 2 milliards d’habitants dans le monde. Ces facteurs 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 (ONU, 2015). La perte des terres arables serait donc de 30 à 35 fois plus rapide que le rythme historique et l’Institut international de recherche sur les politiques alimentaires (IFPRI) situait déjà en 1995 cette perte entre 5 à 10 millions d’hectares. Jamais la planète et les écosystèmes naturels n’ont été autant dégradés par la présence humaine, relève Marc Bied-Charreton, Président du Comité Scientifique Français de Désertification (Raunet et Naudin, 2006).

Les facteurs favorables à cette dégradation sont en l’occurrence la surexploitation culturale, le surpâturage, la déforestation et même les feux de brousse dévastateurs de la biomasse végétale, avec effet de diminution du potentiel de production et même l’abandon de ces sols (Pimentel *et al.*, 1995). Et cette situation s’aggrave à cause d’une utilisation irrationnelle du sol et de l’eau, avec les effets actuels du changement climatique (Gabathuler *et al.*, 2009 ; Muluneh *et al.*, 2014). Ces facteurs ont entraîné une disparition progressive de la végétation et une importante dégradation chimique et physique des terres cultivées (Pieri, 1989).

L'ONU (2015) indique que 74 % de pauvres dans le monde sont touchés directement par la dégradation des terres et Kurt (1996) relevait que 60% des 800 millions des pauvres dans le monde vivent dans les régions rurales où les destructions écologiques sont les plus alarmantes. Et rien n'a plus de poids pour illustrer cette dégradation que l'image d'une ravine large et profonde, et qui s'élargit de plus en plus, d'année en année réduisant de manière substantielle les surfaces cultivables. Et si cette tendance s'accroît, 1,4 à 2,8% des surfaces agricoles, pastorales et forestières existantes devraient être perdues annuellement vers les années 2020 (IFPRI, 1995). Fondamentalement, l'acquisition des machines sophistiquées et matériel divers allant des théodolites aux bulldozers, a révolutionné l'agriculture dans les années 1960, mais avec des insuccès sur le plan de conservation de l'environnement. A travers toute l'Afrique, de grandes zones de projets agricoles se transformèrent en laboratoire expérimental en tenant compte des aptitudes ou utilisations agropastorales. Dans le Nord du Nigéria, les initiatives pour encourager l'agriculture irriguée autour du lac Tchad ont vite échoué, suivies des changements néfastes notables sur l'environnement notamment les sols agricoles. De même, au Burkina Faso, le projet Groupe énergies renouvelables, environnement et solidarités (GERES) a utilisé des engins, qui ont eu un impact négatif sur les diguettes, avec 24% de superficie dégradée (Reij *et al.* 1996).

À l'Extrême-Nord du Cameroun, Brabant et Gavaud (1985) relevaient que sur environ 10 millions d'hectares de terres cultivables, 10 à 20% étaient entièrement dégradés en *hardé* en *Fulfuldé*, équivalant à *naga* au Tchad et *zippelé* au Burkina Faso ; 30 à 40% avaient évolué en terres marginales ; tandis que 40 à 60% restaient encore bien exploitables. Blay *et al.* (2004) indiquaient en outre que près de 13% des terres dans la région de Maroua constituaient des *hardés*, lesquels se caractérisent essentiellement par l'apparition des surfaces incrustées et la perte de la couverture végétale (Tsozué *et al.*, 2014). Njomaha *et al.* (2010) notaient comme indicateur de dégradation des terres en zone cotonnière du Cameroun, entre 1987 et 1990, une diminution de la matière organique et de la capacité d'échange cationique de 1% à 4% par an, une diminution du pH du sol de 0,02 unité par an et des cations potassium, calcium et magnésium de 2% à 4% par an. En effet, un sol dégradé, pauvre en matière organique et en éléments fins, au

complexe absorbant limité, à la fertilité physique réduite, ne peut valoriser les engrais minéraux appliqués (Levrat, 2010). Ce qui a pour corollaire la réduction des surfaces fertiles à exploiter et la baisse des rendements (BRL, 2010 et Tsozué *et al.*, 2014). Cette baisse a été observée sur la culture de coton dans le secteur de Kaélé, de 44,16% de 1992 à 2012, soit 1200 kg/ha en 1992 et 670 kg/ha en 2012 (Hinimbio, 2014) et Naudin (2012) situe en moyenne cette baisse à -8,4 kg/ha/an sur la période de 1980 à 2010. Un déficit global de 163660 tonnes/an de céréales a été également observé dans cette zone (Adoum *et al.*, 2007). De même, 86% des agriculteurs dans la zone de Mindif à l'Extrême-Nord du Cameroun estiment que leurs rendements agricoles connaissent la baisse d'une année à une autre (Biedi, 2000). Les sols ainsi dégradés, à potentiel de production faible, lorsqu'ils ne sont pas abandonnés, ne permettent plus d'obtenir une production agricole satisfaisante, exposant ainsi la population à la malnutrition, la famine et à l'insécurité alimentaire. Dans ces conditions, la durabilité agro-socio-économique paraît inaccessible et la protection de l'environnement et des ressources naturelles ne peut pas devenir la préoccupation majeure des agriculteurs, soucieux de leur futur à très court terme (Raunet et Naudin, 2006).

De ce qui précède et compte tenu de leur caractère non renouvelable à échéance des générations humaines (Citeau *et al.*, 2008), les sols constituent un patrimoine ou un capital dont la gestion durable doit s'imposer comme une préoccupation nationale et internationale. Aussi, l'Etat Camerounais a-t-il adopté en 1999 une politique agricole visant à augmenter la production et les revenus agricoles, à améliorer les facteurs environnementaux et le cadre incitatif du secteur agricole et à moderniser son cadre institutionnel. De même, il a mis une priorité sur la gestion durable des ressources naturelles au niveau du Plan National de Gestion de l'Environnement (PNGE) et du Programme National de Développement Participatif (PNDP). En 2010, le Gouvernement camerounais a entrepris de réviser la stratégie de croissance économique et de réduction de la pauvreté en commettant le Document de Stratégie pour la Croissance et l'Emploi (DSCE), qui remplace ainsi le Document de Stratégie pour la Réduction de la Pauvreté (DSRP) élaboré en 2003. Le DSCE, aujourd'hui en révision, réaffirme la poursuite de la réalisation des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD), devenus aujourd'hui Objectifs de Développement Durable

(ODD), avec les actions de développement durable et de lutte contre la faim, la pauvreté et les changements climatiques. L'objectif 15 des 17 ODD adoptés à l'ONU le 25 septembre 2015 et entrés en vigueur le 1^{er} janvier 2016, se veut préserver et restaurer durablement les écosystèmes terrestres, enrayer et inverser le processus de dégradation des sols et mettre fin à l'appauvrissement de la biodiversité.

Au vu des conséquences néfastes sus-évoquées attribuées à la dégradation des sols et ses effets sur la baisse des rendements agricoles, quelles réponses la recherche peut-elle apporter pour inverser cette tendance de dégradation du patrimoine sol en zone soudano-sahélienne du Cameroun en vue d'accroître la productivité agricole ? Telle est la problématique qui a motivé la conduite de cette thèse, dans l'ultime but de garantir la sécurité alimentaire de la population en perpétuelle croissance ; population qui devrait passer de 6,3 milliards à 8 milliards d'individus au monde en 2030 (FAO, 2003). L'une des options de régression de cette dégradation est l'utilisation des techniques innovantes à productivité durable et protectrices de l'environnement et qui tient compte des contraintes du développement durable (Latiri, 2002). Ce qui réfère à la réhabilitation agroécologique et cette notion est fondamentalement liée au précepte qu'il faut « bien connaître les sols pour mieux les utiliser » (Brabant, 1991). Reij *et al.* (1996) estiment qu'une politique de réhabilitation écologiquement viable doit prendre en compte la réintroduction d'espèces locales dans les écosystèmes. Roose (1992) recommandait déjà l'orientation de la recherche vers des systèmes de production intensifs et durables qui améliorent le bilan chimique, mais surtout couvrent toute l'année le sol d'une litière (litière d'adventices ou autres). Ce qui sied bien avec la technique innovante dite système de culture sur couverture végétale (SCV). Le SCV est introduit au Nord-Cameroun dès 1996 par le Projet de Développement Paysannal et Gestion des Terroirs (DPGT : 1994-2002), poursuivi par le Projet Eau-Sol-Arbre (ESA1 : 2003-2007 et ESA2 : 2007-2012) puis le Programme d'Appui à la Sécurisation et à la Gestion intégrée des Ressources Agropastorales (ASGIRAP : 2015-2019). Dans cette vision d'inversion de la dégradation des sols, une gamme des plantes de couverture a été testée notamment leur adaptabilité et leur productivité aux conditions pédoclimatiques de la zone. La plupart de ces plantes ainsi testées présentent soit une production de biomasse assez faible (*Crotalaria retusa*, *Mucuna pruriens*, *Eleusine coracana*, *Dolichos lablab*) ou sont très

sollicitées pour la nutrition du bétail (*Brachiaria ruziziensis*, *Stylosanthes hamata* et *Vigna unguiculata*). Ces contraintes ont fait orienter le choix sur la bioressource *Crotalaria juncea* L. introduite en 2010 au site de multiplication variétale de Pitoa, après son importation du Brésil par le Projet ESA2. N'ayant pas fait l'objet d'une caractérisation agronomique et économique dans le paysage agricole du Nord-Cameroun, cette légumineuse a donc été choisie dans cette étude comme plante de couverture du sol en milieu contrôlé. En revanche, la graminée *Brachiaria ruziziensis*, bien que déjà caractérisée en milieu expérimental et en vulgarisation depuis 2008 au Nord-Cameroun, n'a pas fait l'objet d'un test en milieu paysan. D'où son choix pour apprécier la performance du SCV en milieu réel de production, en étant *mulch* du coton, principale culture de rente de la zone. Aussi, le maïs, l'une des céréales les plus consommées, a-t-elle été choisie dans cette analyse pour exprimer la réponse du sol aux effets de réhabilitation agroécologique par la crotalaire. En effet, le choix de cette spéculature céréalière, productive et nutritive, se justifie parce que le maïs valorise mieux la fertilisation minérale ; son rendement étant très lié au niveau de fertilité du sol notamment la teneur en azote (Mvondo Awono, 1997). Toutefois, les bioressources *Crotalaria juncea* et *Brachiaria ruziziensis* peuvent-elles assurer la reconstitution de la fertilité des sols dégradés en zone cotonnière de l'Extrême-Nord du Cameroun ? D'où cette analyse dont l'objectif global est de contribuer à l'amélioration de la productivité agricole à travers la réhabilitation agroécologique et la gestion durable de la fertilité des sols. Plus spécifiquement, il s'est agi de : (i) caractériser le milieu biophysique des sites de référence (Kodek et Zouana), en matière de végétation, de pluviométrie et de variation des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols ; (ii) évaluer le potentiel de fixation de l'azote atmosphérique par la symbiose *Rhizobium japonicum-Crotalaria juncea* ; (iii) évaluer les paramètres culturels dont la densité, la taille des plants et les quantités de biomasses (aérienne et racinaire) annuellement produites ; (iv) évaluer et comparer les rendements du maïs (*output*) en SCV et sur les différents niveaux de fertilisation en N (*input*) et en déterminer la valeur de remplacement en fertilisant azoté inhérente à la crotalaire ; (v) et évaluer en milieu paysan la performance en rendements coton sur *mulch* de *Brachiaria ruziziensis* par rapport au système conventionnel et en dégager une analyse économique des agrosystèmes comparés.

Le choix de Kodek et Zouana comme sites expérimentaux se justifie par le niveau de dégradation assez poussé de leurs sols, ces sites étant proches des stations de recherche sur le coton (Guiring et Makébi) et exploités depuis plus de 60 ans. En effet, les exploitations cotonnières se sont installées dans ces zones à la faveur de la création de la Compagnie française de développement des fibres textiles (CFDT) en 1950. L'importance de la présente thèse est donc de ressortir la contribution du SCV dans la réhabilitation des sols dégradés et la préservation de leur fertilité. Cette amélioration de la fertilité se traduit par une amélioration des rendements des cultures pour garantir la sécurité alimentaire, préserver l'environnement et lutter contre la pauvreté à travers l'amélioration des revenus agricoles. Sur le plan environnemental, la couverture du sol par les bioressources *Crotalaria juncea* L. et *Brachiaria ruziziensis* réduit l'érosion pluviale et éolienne du sol. Cette technique permet de réduire également la dose recommandée d'engrais minéral, limitant de ce fait l'effet éventuel de phytotoxicité ou de pollution des sols. Le temps de travail et le coût de production agricole se retrouvent aussi réduits du fait de l'absence des opérations de labour, de sarclage et de buttage, ce qui fait accroître la valeur ajoutée nette. La crotalaire, fixe l'azote atmosphérique de manière symbiotique avec la bactérie *Rhizobium japonicum* ; ce qui rehausse la teneur du sol en azote assimilable par les cultures, et partant une augmentation des rendements. La crotalaire et le *Brachiaria ruziziensis* participent à la séquestration du carbone et leur biomasse assure au sol un apport en humus pour assurer sa stabilité structurale, mais aussi un apport en minéraux mobilisables par les cultures. Le complexe argilo-humique qui se forme, fixe davantage l'eau et les éléments nutritifs pour les plantes, lesquels éléments sont exposés à la percolation ou au ruissellement en absence de ce complexe. Ainsi avec le SCV, le statut organique, minéral et hydrique du sol se trouve amélioré, avec une amélioration subséquente de la productivité agricole.

La présente thèse a donc pour principales articulations : une introduction générale, les concepts, les théories et la revue de la littérature sur le sol, les facteurs de sa dégradation et la gestion de sa fertilité ; le matériel et les méthodes utilisés pour collecter et analyser les données ; les résultats obtenus, leur discussion et enfin, une conclusion générale.

Partie 1 : Concepts, théories et revue de la littérature

Chapitre 1 : Cadre conceptuel et théorique

Le sol, support des activités agricoles, s'épuise lorsque sa fertilité n'est pas entretenue. Pour préserver son utilisation à long terme, la réhabilitation agroécologique est nécessaire avec au besoin, une fertilisation raisonnée, respectant les principes et lois y afférents.

1.1 Concept de sol agricole

Le sol est l'un des facteurs fondamentaux de la production agricole, tout comme le capital et le travail. Sur le plan pédologique, le sol est défini comme la formation naturelle de la surface terrestre à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche mère. Brabant (1991a) préfère parler du « système-sol » qu'il définit comme un volume déterminé de la couverture pédologique de la terre, de dimension variable, souvent d'ordre kilométrique et constitué d'une combinaison ordonnée d'horizons. Sur un plan plus utilitaire dont agrologique, le sol agricole ou arable est la couche superficielle de l'écorce terrestre, qui produit ou qui peut produire des plantes utiles à l'être humain dont les cultures alimentaires, fourragères et fibreuses ainsi que du bois (Kurt, 1966). Citeau *et al.* (2008) le définissent comme une surface productive (aliments, biomasse) ou un espace à bâtir, riche d'une diversité d'organismes, dont la dégradation a une incidence non négligeable sur l'air, l'eau et la santé.

En effet, les sols remplissent 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 (Citeau *et al.*, 2008). La première fonction dédiée aux sols agricoles est la production des biens et services agricoles et à ce titre, les sols sont un facteur de production non substituable, et contribuent alors à la production des aliments et d'autres produits utiles à la survie de l'humanité (Oumarou, 2012). Il n'y a pas de développement des sociétés sans utilisation des sols et l'équilibre entre les potentialités du sol et la pression des activités humaines n'a de chance d'être respecté que si l'homme apprend à connaître le sol (Ruellan, 1994). Au vu de l'importance accordée au sol, l'année 2015 a été déclarée par la 68^{ème}

Assemblée Générale des Nations Unies, année internationale des sols, l'objectif étant de sensibiliser pleinement sur les rôles fondamentaux des sols pour la vie humaine et promouvoir des politiques et des pratiques efficaces afin d'assurer une gestion et une protection durables des ressources en sols. L'ONU (avec ses 193 États membres) relevait au sommet du 15 septembre 2015 à New-York que 2,6 milliards de personnes dans le monde dépendent directement de l'agriculture, mais 52% des terres agricoles sont touchées par la dégradation des sols qui concerne ainsi 1,5 milliard de personnes, soit 57,69% des agriculteurs.

Le potentiel de production du sol résulte de la richesse des roches, de l'agressivité du climat qui appauvrit plus ou moins vite le sol, des érosions naturelles qui rajeunissent en permanence les sols appauvris, de l'histoire des activités humaines (CIRAD-GRET, 2002). Comme support des plantes, le sol est souvent unique capital pour la plupart des agriculteurs de la zone tropicale d'Afrique et au cœur du fonctionnement et de la résilience des agroécosystèmes, bien que la culture hydroponique ou hors-sol ne fasse pas un lien direct entre la nutrition de la plante et le sol. Pour les sociétés humaines, le sol est source de vie ; par l'intermédiaire des plantes, des animaux, de l'eau, des minerais, le sol nourrit les hommes, leur santé et leurs activités en dépendent. Il est donc essentiel, pour tous, de savoir le connaître et de savoir l'utiliser (CIRAD-GRET, 2002). Cette logique s'inscrit dans la gestion rationnelle et durable du sol : en nourrissant bien le sol, il nous nourrira bien.

Le sol provient de l'altération de la roche mère couplée à divers processus qui sont physiques, chimiques et biologiques. Ces processus confèrent aux sols des caractéristiques qui peuvent différer selon le milieu et l'intensité de leur exploitation. Le sol est un milieu naturel dynamique, en perpétuelle évolution, siège d'une extraordinaire biodiversité, avec des fonctions environnementales : régulation du cycle des éléments, séquestration du carbone, épuration de l'eau, régulation des flux hydriques, support de la biodiversité et des paysages, etc. (Citeau *et al.*, 2008). La notion de développement durable et des intérêts liés aux sols oriente progressivement à partir des années 1980, le débat et la recherche de la question de la rente foncière, considérant la fertilité comme donnée liée au capital « sol », dans une problématique renouvelée de

gestion du capital naturel (Deutsch *et al.* 2003; Ekins *et al.* 2003; Ekins 2003; Giraud 2008). Les minéraux primaires (feldspath, quartz, mica) constituent donc une partie importante des fractions sableuses et limoneuses du sol et les minéraux secondaires se retrouvent dans la fraction argileuse, à propriétés colloïdales (kaolinite, illite, montmorillonite, vermiculite). La différence principale entre terre et sol (au sens de pédon) provient donc du fait que le concept de terre inclut de nombreux facteurs de l'environnement physique et humain du sol, même si le sol reste, dans la plupart des cas, la composante principale d'une terre (Brabant, 1991b). Ainsi, dans l'évaluation des terres, les facteurs climatiques interviennent pour la détermination des aptitudes de production des sols en plus des caractéristiques propres desdits sols, qui définissent leur fertilité.

1.2 Clarification conceptuelle de la fertilité du sol

La fertilité d'un sol est son aptitude naturelle ou acquise à produire des récoltes plus ou moins abondantes et régulières à partir d'une culture donnée et en fonction de ses qualités intrinsèques et des conditions extrinsèques : climat, qualité des semences, date de semis, densité, protection phytosanitaire, contrôle des adventices, etc. (Mvondo Zé, 2001). C'est aussi l'aptitude d'un sol à produire sous son climat (Raunet et Naudin, 2006), aptitude qui se mesure à l'abondance des récoltes obtenues lorsqu'on applique à ce sol les techniques agricoles convenables (Lozet et Mathieu, 1997). La fertilité des sols est un concept utilisé sur la nécessaire augmentation de la production agricole (développement des filières, sécurité alimentaire, réduction de la pauvreté...), mais aussi largement sous l'angle de l'évolution des systèmes de production (durabilité, crise ou rupture...). La fertilité est maintenue, entretenue, soutenue, renforcée, améliorée ou même régénérée. Elle concerne le domaine prioritaire de la production alimentaire et du maintien d'une activité agricole dans une région donnée. La fertilité des sols peut être une notion biophysique, il s'agit de l'aptitude d'un sol à produire. Le potentiel agricole de production est défini par la nature du sol, sa structure, sa texture, sa composition organique et la matière organique assimilable, les éléments chimiques disponibles (capacité d'échange cationique), le climat et la topographie (Blanchard, 2010).

Pour les économistes classiques et les physiocrates, la fertilité naturelle de la terre est une donnée naturelle pour laquelle les services de production offerts par les sols agricoles n'ont aucun coût (Oumarou, 2012). Ange (1991) définit la fertilité d'une parcelle de culture comme sa capacité à produire une denrée agricole à partir d'un matériel végétal particulier et sous un itinéraire technique donné, dans la situation pédoclimatique spécifique d'une année. L'itinéraire technique étant une suite logique et ordonnée des techniques et opérations culturales appliquées à une culture donnée. Des capacités propres des sols, dépend le niveau de production, lorsque la question d'accès aux autres facteurs de production ne se pose pas (Oumarou, 2012).

La fertilité actuelle d'un sol est son aptitude à produire dans des conditions actuelles de culture et se mesure par le rendement actuellement obtenu. La fertilité potentielle quant à elle, est l'aptitude d'un sol à produire dans des conditions optimales de nutrition, à la suite de l'action de l'homme sur les facteurs modifiables de la fertilité (gestion de la fertilité) ; notamment l'apport des fertilisants (engrais et amendements) dit fertilisation. Cette aptitude se mesure par le rendement maximal. Oumarou (2012) définit la gestion des sols comme l'ensemble des actions et décisions individuelles et collectives mises en œuvre afin d'assurer la production agricole, la protection des sols, ou la production d'autres services écosystémiques. De fait, la fertilité des sols n'est plus uniquement perçue comme un ensemble de caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols. Elle n'est pas une valeur absolue, mais dépend des objectifs de production visés par l'agriculteur et de ses capacités d'intervention. Sebillotte (1993) en a donné une définition plus consensuelle, en la reliant à la fois à l'usage qu'en fait l'agriculteur, mais aussi à la capacité d'intervention de ce dernier. L'étude de l'évolution de la fertilité des sols s'appuie sur différents indicateurs de la qualité des sols et des indicateurs indirects de la fertilité des sols dont le taux de matière organique des sols, les éléments minéraux, la texture et la structure du sol, le niveau de rendements, ... (Blanchard, 2010).

Alors que l'idée de potentialité semble communément admise dans la communauté scientifique pour définir la notion de fertilité, Mazoyer et Roudart (1997) contribuent à élargir le concept en considérant que la fertilité globale d'un écosystème cultivé se mesure par sa capacité à produire durablement de la biomasse végétale. Les notions de

durabilité et de fertilité utile nourrissent cette vision, qui prend en compte la perception paysanne de la fertilité des sols. Ce que Kossoumna Liba'a (2012) regroupe en indicateurs de fertilité paysanne : couleur du sol et des végétaux, espèces fauniques et floristiques présentes, densité végétale, température et odeur du sol. Ainsi, Blanchard (2010) identifie les espèces *Eleusine indica*, *Pennisetum pedicellatum*, *Eragrostis tremula*, comme indicateurs des sols fertiles tout comme le *Cyperus esculentus* ; tandis que *Cynodon dactylon*, *Bulbostylis barbata*, *Mitracarpus villosus*, *Commelina benghalensis*, *Dactyloctenium aegyptium* et même *Striga hermonthica* relèvent des sols dégradés. Et la notion de gestion durable de la fertilité d'un sol se veut préserver de manière satisfaisante le potentiel de production utile de ce sol sur le long terme.

Trois principaux facteurs définissent donc la fertilité du sol (Mvondo Zé, 2001) : (i) les facteurs physiques (profondeur du sol, texture, structure, eau du sol) ; (ii) les facteurs physico-chimiques (pH, salinité du sol) ; (iii) les facteurs chimiques (éléments chimiques indispensables à la croissance des végétaux). Comme facteurs chimiques de la fertilité, en plus des 3 éléments (C, H, O) qu'on retrouve dans la plante, 13 éléments chimiques sont en général indispensables à la croissance des végétaux : (i) les éléments majeurs ou macroéléments primaires (N, P, K) et secondaires (Ca, Mg, S) et (ii) les éléments mineurs dits oligoéléments ou microéléments (Mn, Cu, Zn, B, Fe, Cl, Mo). Le Na, indispensable à certaines plantes comme le coton, semble suppléer dans certains cas le K et le libérer à d'autres fonctions plus électives. Son excès entraîne des modifications défavorables de la structure du sol. Les oligoéléments Co, Se, I, sont par contre non indispensables pour le développement de la plante mais nécessaires pour la nutrition animale. La concentration des macroéléments est supérieure à 1000 µg/g de matière sèche et celle des microéléments, inférieure à 100 µg/g de matière sèche (Nguy Ntamack, 2001).

Beaucoup d'éléments chimiques peuvent se retrouver dans les plantes, mais ils ne sont pas tous indispensables à leur croissance. S'ils sont trop abondants, ils peuvent devenir toxiques. Par ailleurs, on peut avoir les maladies de carence, dues à l'insuffisance d'un élément minéral. La rhizosphère, zone du sol au contact de la racine, est modifiée par l'absorption de certains éléments minéraux, par la variation des teneurs en O₂ et par

l'excrétion des substances organiques. Les racines absorbent très efficacement et sélectivement les éléments minéraux se trouvant à proximité, les feuilles aussi ont la capacité d'absorber certains éléments en faibles concentrations, à travers leurs stomates, notamment en mode de fertilisation foliaire. Les éléments minéraux en profondeur peuvent aussi se retrouver en surface soit par remontée capillaire soit par leur prélèvement par les racines. La loi du minimum de Liebig, chimiste allemand du XIX^{ème} siècle, stipule que c'est surtout le facteur chimique le plus éloigné de son optimum qui limite la production. Les actions sur les autres facteurs sont peu efficaces tant que l'on n'a pas corrigé le facteur le plus limitant (CIRAD-GRET, 2002). L'apport d'engrais permet donc de corriger le niveau de dégradation de la fertilité des sols notamment les carences en éléments minéraux du sol. On distingue ainsi par rapport aux éléments majeurs (NPK) des engrais composés ternaires ou binaires et des engrais simples qui sont azotés, phosphatés et/ou potassiques.

1.3 Concept de dégradation des sols

Raunet et Naudin (2006) définissent la dégradation comme une destruction lente ou une évolution défavorable d'un sol (perte de sa biodiversité et de sa résilience faisant effondrer sa structure), d'une forme de relief, de divers processus et d'un changement de conditions de milieu (climat, végétation, régime hydrique, homme, etc.) par rapport aux conditions initiales de genèse. C'est aussi la diminution physique du stock du capital sol (Lal *et al.*, 1989, Oumarou, 2012), suite aux phénomènes physiques, qui peuvent alors en diminuer la productivité agricole et/ou les autres services écosystémiques fournis. Dans cette dimension physique, la dégradation des sols est souvent estimée par le volume ou la quantité de sols perdus, ou bien par la profondeur du sol agricole diminuée. Pour l'Organisation des Nations Unies pour la protection de l'environnement (UNEP), une dégradation à l'extrême des terres conduit au phénomène de désertification, qui est défini comme une destruction du potentiel biologique des terres (Nkonya *et al.*, 2011). Dugué (2009) relève que la baisse de la fertilité des sols est due notamment à la disparition progressive de la jachère, conséquence de la forte pression sur le foncier. Les indices de dégradation de la végétation sont l'augmentation des épiphytes, la diminution des graminées pérennes, de la biomasse et de la diversité

spécifique. Ce qui peut être observé sur les sols fersiallitiques et ferrugineux, qui sont susceptibles de retrouver un potentiel et une physionomie comparables à ceux des réserves forestières de la région. Par contre sur les glacis vertisoliques, certaines zones fortement dégradées ou *hardés* ont atteint des seuils d'irréversibilité dans la dégradation des caractéristiques physico-hydriques et de la végétation (Donfack et al., 1993). Une dégradation des sols non contrôlée peut mener à la perte complète de leur capacité de production utile à l'homme (Douglas, 1994). Selon Kurt (1966), la dégradation des sols est une détérioration de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, en particulier : (i) la diminution des réserves de nutriments (appauvrissement du sol) ; (ii) la décomposition de la matière organique et, par conséquent, la détérioration de la structure du sol, de la capacité de rétention d'eau, de l'absorption et de la libération de nutriments ; (iii) l'acidification du sol, qui provoque des problèmes de toxicité aluminique et le blocage des phosphates ; (iv) la salinisation par une irrigation et un drainage insuffisants, ce qui entraîne la perte de surfaces relativement petites mais hautement productives ; (v) la perte de l'horizon superficiel (décapage du sol) par érosion hydrique et éolienne (principalement sélective, qui touche les particules fines, riches en nutriments). En plus des facteurs biophysiques, la forte croissance démographique en corrélation avec la pression foncière est l'une des causes de la dégradation des sols. Celle-ci a entraîné une raréfaction des terres disponibles, ce qui s'est traduit par un raccourcissement des périodes de jachère et une extension spatiale vers des zones marginales. En effet, les vertisols dégradés sont ceux à pédoclimat sec, présentant un faciès dégradé. Le ruissellement est plus fort que sur les vertisols modaux, et peut parfois dépasser 50 %, ce qui entraîne un décapage. L'infiltration est faible à cause d'une pellicule de battance qui entraîne une diminution du coefficient d'efficacité des pluies (Donfack et al., 1988).

La notion de dégradation et la notion de désertification notamment en zone tropicale, sont proches. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, établie en 1994, définit la désertification comme « *la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines* ». Le concept de dégradation des terres et des écosystèmes est lié à une perception globale, qualitative et négative, qui

sous-tend des processus insidieux (d'origine naturelle et humaine) complexes et très difficiles à enrayer, mêlant causes, effets, conséquences avec leurs multiples boucles de rétroaction. Ces processus impliquent des aspects climatiques, écologiques, agricoles, économiques et sociaux, liés, pour ces derniers, à un usage et un partage de ressources raréfiées (bois, sols fertiles, eaux, pâturages, faune chassée, ...) du fait de trop fortes pressions exercées sur celles-ci ou de concentrations humaines excessives. Cette dégradation fait suite à une rupture d'équilibre écologique et concerne la diminution de la productivité de l'écosystème, c'est-à-dire de la fertilité du sol, de celle du couvert végétal, des pâturages, de la biodiversité, etc. S'ajoute à la dimension éco-climatique, la dimension humaine : pression anthropique excessive, difficulté de vivre et de produire dans ces écosystèmes, risques, pauvreté, nécessité d'adaptation, etc.

En effet, les particules d'un sol formé peuvent subir la dégradation et la migration. Les produits de l'altération des roches et des activités biologiques sont l'objet, dès leur naissance, de phénomènes migratoires, au sein de la couverture pédologique, et parfois, hors de celle-ci. On distingue donc (i) des mouvements de particules solides, par activités biologiques, par gravité au sein des porosités, par entraînements hydriques interne et externe (érosion), par mouvements de masse liés à des changements de volume ; (ii) des mouvements sous forme soluble, faisant suite à l'hydrolyse et à la solubilisation ou à la complexation par des matières organiques. Si la dégradation des sols est la diminution de la capacité d'une terre à atteindre un certain rendement pour un type d'utilisations données et une méthode de production définie (Blaikie et Brookfield, 1987) ; l'érosion est donc décrite comme étant l'ablation et le transport latéral de particules solides du sol par l'eau et le vent sur la surface du sol (Kurt, 1966). L'érosion désigne aussi l'ensemble des phénomènes qui enlèvent tout ou en partie les matériaux de la surface du sol. Eno Belinga (1984) la définit comme l'usure des reliefs provoquée par toutes les forces d'origine externe et cette action s'accompagne d'un transport des sédiments et de leur dépôt ou sédimentation. Dufumier (1996) relève que l'appauvrissement du couvert végétal expose davantage les terres aux agents d'érosion ; les arbres disséminés ne jouent plus le rôle de brise-vents et les pluies frappent directement les sols sans aucune protection. L'AFD (2006) indique que l'érosion hydrique et éolienne est la principale cause de dégradation des terres cultivées et

engendre des pertes des terres considérables, en particulier sur les sols dénudés et des défriches récentes. Cette érosion représente une contrainte majeure dans le développement agricole des pays moins avancés en contribuant à la baisse de la fertilité des sols.

L'érosion hydrique en nappe entraîne la perte en nutriments et en éléments fins (argile, humus) du sol (Dugué, 2009). Elle réduit aussi les surfaces cultivables à travers l'installation des rigoles ou des ravins et diminue la recharge en eau des nappes phréatiques du fait du ruissellement important des eaux. L'intensité de l'érosion dépend de l'érosivité de la pluie (capacité de la pluie à détacher les particules du sol) et de l'érodibilité du sol (capacité du sol à résister à l'érosion). Ainsi, une averse de 100 mm peut faire rejaillir 300 tonnes de sol et les sols pauvres en matière organique sont les plus affectés par l'érosion. L'érosion dépend d'une part de la mobilité des matériaux et d'autre part, des constituants du sol plus ou moins fortement liés entre eux. La dégradation chimique des sols se produit lorsque certaines réactions chimiques telles que l'hydrolyse, l'oxydation, la carbonisation, la dissolution et la sulfatation viennent à modifier la structure du sol (Hieng, 2010).

Kurt (1966) note que le sol est une ressource au renouvellement limité. Au niveau mondial, seuls 11% (1500 millions d'hectares) de la couche supérieure du sol peuvent être utilisés sans restriction à des fins agricoles ; 28% des surfaces sont très sèches, 23% présentent un déséquilibre des nutriments, 10% sont très humides, 6% sont durablement gelées et les 22% restants sont trop superficiels. En plus de l'érosion géologique qui est la dégradation des roches et des montagnes, on observe l'érosion anthropique liée à l'action de l'homme sur les sols à travers la déforestation, les feux de brousse, le surpâturage, la mauvaise gestion agricole et même les travaux d'urbanisation. Globalement, l'agriculture est responsable de la dégradation de 28% des près de deux milliards d'hectares de terres dégradées par l'activité humaine, alors que le surpâturage est responsable de 34% et la déforestation de 29% (Université Virtuelle Africaine, 2002). Cette action anthropique expose davantage les sols à la dégradation par le vent (érosion éolienne) et par la pluie (érosion pluviale). Ainsi, on peut observer une perte en terres de l'ordre de 50 tonnes/ha/an sur des sols soumis à l'action anthropique contre 1

à 2 tonnes/ha/an sous l'érosion géologique (CTA, 1966). L'érosion est particulièrement forte dans les zones à écologie fragile, marquées par un relief accentué par des fortes pluviométries annuelles et/ou par l'intensité des précipitations isolées, par un couvert végétal mince et par des sols physiquement instables (Kurt, 1966). Au gré des saisons, le sol change d'aspect et de fonctionnement notamment en régime hydrique. D'année en année, les sols naissent, puis s'enrichissent, puis s'appauvrissent (CIRAD-GRET, 2002). La roche située à la base du sol est en revanche compacte et difficilement fragmentée comme le socle granito-gneissique au Nord-Cameroun, formation largement dominante.

Dans le domaine de la pédologie et de l'écologie, la régression et la dégradation sont des processus d'évolution associés à une perte d'équilibre d'un sol antérieurement stable. La régression d'un sol est essentiellement due à l'érosion, tandis que la dégradation résulte souvent d'une combinaison de facteurs, incluant éventuellement la régression, qui conduisent le sol vers une évolution différente de l'évolution naturelle liée au climat et à la végétation locale. La régression est généralement liée au remplacement de la végétation primitive diversifiée (dite climacique) par une végétation secondaire (monoculture par exemple), qui modifie la formation du sol. La dégradation commence généralement avec la destruction du couvert végétal, phénomène depuis longtemps connu puisque Platon lui-même, 400 ans avant J.-C. écrivait dans le Critias : « *Notre terre est demeurée, par rapport à celle d'avant, comme le squelette d'un corps décharné par la maladie. Les parties molles et grasses de la terre ont coulé tout autour, et il ne reste plus que la carcasse nue de la région* ». Quelques siècles plus tard, les chroniqueurs décrivaient la disparition de près de 600 localités antérieurement prospères le long de la côte africaine entre l'Égypte et le Maroc, à la suite de la déforestation imposée par l'Empire romain qui venait là se servir en bois pour ses bateaux et chars de guerre. Les sédiments issus des labours et de la déforestation ont comblé la Mer Égée sur cinq kilomètres en aval du port d'Éphèse, autrefois célèbre pour abriter un temple dédié à Artémis. Les racines et les radicelles sont par contre de puissants facteurs de cohésion du sol, mais parfois insuffisants face au ravinement. La déshydratation est un autre facteur de dégradation et d'érosion des sols. Sur sols limoneux fragiles, les passages répétés d'engins lourds est un facteur d'asphyxie et de dégradation du sol, tout

autant que la destruction du couvert forestier protecteur (canopée), notamment en zone tropicale. Il est donc nécessaire d'y mener une régénération agroécologique.

1.4 Concept de réhabilitation agroécologique du sol

Etant donné que la terre, le travail et le capital constituent les trois facteurs fondamentaux de la production agricole ou ressources productives lorsque le climat y est associé, il est tout indiqué que la terre en l'occurrence sa fertilité, soit mieux gérée pour mieux produire. En plus du sol, l'eau, ressource parfois rare et aléatoire mais indispensable à la productivité agricole, doit aussi recueillir l'attention. En effet, l'eau, en grande partie perdue par ruissellement et évaporation, doit aussi être conservée au profit du système sol-plante afin de produire plus de biomasse végétale (Raunet et Naudin, 2006) servant de couverture du sol et assurant une bonne teneur en humus.

Le terme agroécologie a été utilisé pour la première fois en 1928 par Basil Bensing, agronome américain d'origine russe. Les racines de l'agroécologie comme science sont principalement issues de l'agronomie et de l'écologie mais ces dernières années, elle a aussi mobilisé très largement toutes les sciences sociales. L'agroécologie, comme courant de pensée et d'action, en recherche et en ingénierie, est une discipline qui vise à ne pas séparer écologie et agriculture, appliquée aux systèmes et filières de production dans un objectif de développement durable et de protection de l'environnement (Raunet et Naudin, 2006). Elle est aussi une discipline scientifique et technique respectueuse de l'environnement, agronomiquement et économiquement performante et porteuse du développement humain, avec une portée durable (Hinimbio, 2016). Miguel Altieri (1995), pionnier de cette discipline, la définit comme la science de la gestion des ressources naturelles au bénéfice des plus démunis confrontés à un environnement défavorable. Cette science, de nature biophysique au sens large, porte ainsi sur l'accumulation de connaissances en fonctionnement des écosystèmes cultivés. Elle conduit à la conception, à la création et à l'adaptation sous la forme participative de systèmes de culture complexes, productifs et attractifs malgré un milieu défavorable et un recours très faible aux intrants,... Le respect de l'environnement est donc une composante très importante dans l'agroécologie ; l'environnement étant défini comme l'ensemble des facteurs externes qui peuvent affecter un organisme. Ces facteurs

peuvent être d'autres organismes vivants, mais aussi des variables abiotiques telles que l'eau, le sol, le climat, la lumière, l'oxygène. De Graaff (1997) distingue dans l'écosystème les ressources naturelles irréductibles (soleil, vent et air) et les ressources naturelles réductibles qui peuvent être soit renouvelables (eau, sol, animaux et plantes), soit non renouvelables (minéraux et énergies fossiles). Un agroécosystème est par contre, un écosystème aménagé par l'homme en vue d'une production agricole. Raunet et Naudin (2006) le définissent comme un écosystème dans lequel prennent place des activités de production agricole.

Le concept d'agroécologie fédère plusieurs écoles : agriculture biologique, agriculture de conservation, agroforesterie, agriculture intégrée, lutte intégrée contre les ravageurs, agriculture durable, etc. L'enjeu véritable étant de concilier la performance économique et environnementale en produisant efficacement et plus durablement. On peut reconnaître à l'agroécologie 5 grands principes : (i) le recyclage de la biomasse et l'équilibre du flux et de la disponibilité de nutriments ; (ii) la sauvegarde de conditions du sol favorables pour la croissance des plantes, à travers le renforcement de la matière organique et de l'activité biotique des sols ; (iii) la minimisation des pertes de radiation solaire, d'air, d'eau, de nutriments, grâce à la gestion des microclimats, à la collecte de l'eau et à la couverture du sol ; (iv) le renforcement de la diversification génétique et des espèces de l'agroécosystème dans le temps et dans l'espace ; (v) le renforcement des interactions biologiques parmi les composantes de l'agro-biodiversité.

En effet, une agriculture inspirée de l'agroécologie joue sur la diversité des rotations, des assolements, des cultures associées et s'appuie sur l'agroforesterie, les diguettes filtrantes en courbes de niveau, etc. L'évolution et le développement des pratiques agroécologiques démontrent qu'elles permettent de renforcer l'efficacité, la viabilité et la résilience de la production agricole (Inter-réseaux, 2014). L'écologie de la restauration est une science qui est apparue dans les années 1980, afin de lutter contre la dégradation rapide de la biodiversité et des écosystèmes. Aussi appelée restauration écologique, elle fait recouvrir des écosystèmes qui ont été endommagés voire détruits par les activités humaines. Le but est de restituer un écosystème donné tel qu'il était à l'origine, avant d'être impacté par l'industrie ou l'agriculture. La restauration écologique fait appel au

génie écologique, une approche scientifique qui mêle ingénierie et écologie pour recréer un écosystème et préserver sa biodiversité. Quand c'est possible, la restauration écologique s'accompagne de la réintroduction d'espèces ayant disparu de la zone. La restauration des sols concerne en effet les interventions mises en œuvre pour inverser une dégradation antérieure, par opposition à la conservation des sols qui désigne des actions et pratiques préventives pour anticiper sur la dégradation des sols (Bishop et Welsh, 1992; Barbier et Bishop, 1995). Cette différenciation, si elle existe en termes d'analyse technique, ne se perçoit pas parfaitement dans l'analyse économique (Oumarou, 2012). En effet, conservation et réhabilitation représentent des investissements privés ou collectifs pour maintenir le stock de capital (conservation) ou bien l'accroître (conservation et réhabilitation). Il faut également noter que du point de vue économique, la conservation des sols est bien plus efficiente et moins onéreuse que sa réhabilitation (Bojöö, 1991; Bojöö, 1996).

Réhabiliter des espaces dégradés signifie aussi qu'il faut les adapter à un nouveau système économique et leur restituer un nouvel usage en les réaménageant, durablement c'est-à-dire dans un objectif de développement compatible avec les besoins des générations futures. Après la mise en œuvre de procédés de restauration, de réhabilitation ou remise en état, la requalification de sites dégradés peut être de nature économique (retour de zones d'activités ou de zones résidentielles), sociale (implantation de centres culturels) ou paysagère (mise en place de parcs extensifs ou de zones forestières). La réhabilitation a fréquemment été nommée réclamation en anglais particulièrement quand il s'agissait de revégétalisation de terrils miniers. Le terme réclamation a par ailleurs été utilisé comme synonyme de la restauration et dans quelques milieux comme réaffectation (Aronson *et al.*, 2010). La politique de réhabilitation agroécologique a progressivement été développée dans bon nombre de pays, avec un impact positif sur la modification des écosystèmes dégradés. En Ethiopie par exemple, les effets désastreux de la sécheresse de 1984 avaient amené le gouvernement à intensifier la conservation de l'eau et des sols, avec des résultats impressionnants : des milliers de kilomètres de banquettes et de terrasses ont été réalisés, une multitude de versants de collines ont été mis en défens, l'agriculture sur des pentes raides a été abandonnée et des millions d'arbres ont été plantés (UICN, 1990). En

Afrique australe, la réintroduction des espèces qui s'étaient éteintes localement, associées aux espèces exotiques a eu un extraordinaire succès et on a pu reconstruire la nature « à partir de rien », autrement dit à partir des champs et des ranchs bovins (Mayaka *et al.*, 2007). Et au Niger et précisément dans le département de Tahoua, le Fonds international pour le développement de l'agriculture (FIDA) a financé en 1988 un projet de 4 ans sur la construction de cordons pierreux sur 2300 ha et l'aménagement de 320 ha en demi-lunes. Les insuccès des approches de conservation des terres dans certaines de ces zones peuvent toutefois être justifiés par la médiocre participation de la population à l'exécution de ces projets, du fait d'un manque de concertation préalable entre l'encadrement technique et le paysannat. Pourtant, des déclarations optimistes étaient ressorties du Sommet de la Terre en 1992 à Rio de Janeiro, affirmant que la participation de la population est la voie à suivre pour obtenir une gestion efficace des terres.

De nouveaux corps de métiers ont fait leur apparition pour poursuivre cette activité nouvelle, comme celui d'ingénieur écologue ou d'ingénieur de l'environnement. L'écologie de la restauration ne doit pas en effet être confondue avec la réhabilitation écologique. La réhabilitation écologique d'un espace vise à favoriser le retour d'éléments naturels (arbres, animaux) et à mettre en valeur le paysage. Le terrain ne revient pas forcément à son état antérieur. L'écologie de la restauration se fixe, elle, un objectif bien plus ambitieux encore : le retour à l'état d'origine d'un écosystème et de sa biodiversité. La *Society for Ecological Restoration* (SER) définit la restauration comme "la transformation intentionnelle d'un milieu pour y rétablir l'écosystème considéré comme indigène et historique. Le terme "restauration" est souvent réservé au rétablissement de la biodiversité, de la structure et des fonctions d'écosystèmes présentant encore un niveau suffisant de résilience (dégradation non irréversible) pour que l'intervention de l'homme soit, si possible, limitée à une diminution puis un contrôle de son niveau de pression (Aronson *et al.*, 2010). La biodiversité étant définie par l'UICN (1988) comme la diversité biologique ou la variété et la variabilité de tous les organismes vivants. Cela inclut la variabilité génétique à l'intérieur des espèces et de leurs populations, la diversité des complexes d'espèces associées et de leurs interactions, et celle des processus écologiques qu'ils influencent ou dont ils sont les acteurs.

La restauration s'impose aujourd'hui comme une nécessité absolue et met en cause nos différents modèles économiques et la démographie croissante doublée de phénomènes de précarité. Cette restauration écologique, qui doit d'ailleurs être couplée avec des systèmes d'exploitation durables et la modification de nos modes de consommation, peut avoir des objectifs qui ne répondent pas directement à une demande sociale ou économique. Elle se caractérise par un degré d'imprévisibilité (Dutoit et Sabatier, 2010). La restauration tend vers le retour de l'écosystème, la réhabilitation insiste sur la réparation et la réaffectation vise quant à elle un autre usage pour lequel aucune référence historique n'est requise. Comme la restauration écologique permet d'assister la régénération des écosystèmes qui ont été dégradés, endommagés ou détruits, elle nécessite une bonne connaissance de l'écologie fonctionnelle et évolutive des écosystèmes ciblés, de l'histoire de la dégradation anthropique et, enfin, le choix d'un écosystème de référence pour guider la planification, la réalisation, le suivi et l'évaluation du projet de restauration. Un écosystème restauré a plus de chance d'être résistant, résilient et donc viable qu'un écosystème délaissé et abandonné, ou qu'un système construit ou assemblé sans modèle de référence. Les trois réponses peuvent très bien être planifiées et réalisées en même temps, à l'échelle des paysages et des écorégions. Notons cependant que des évaluations des objectifs fixés doivent être conduites pour mesurer les aspects culturel, économique ou social. Pour cela, les techniques d'évaluation doivent inclure les sciences sociales. L'évaluation des buts socio-économiques est importante pour les décideurs et par la suite pour les responsables politiques qui choisissent (ou non) la mise en œuvre de projets de restauration (Aronson, 2010). Ainsi, un modèle basé sur la dégradation des écosystèmes avec des voies de restauration est ainsi proposé (Figure 1).

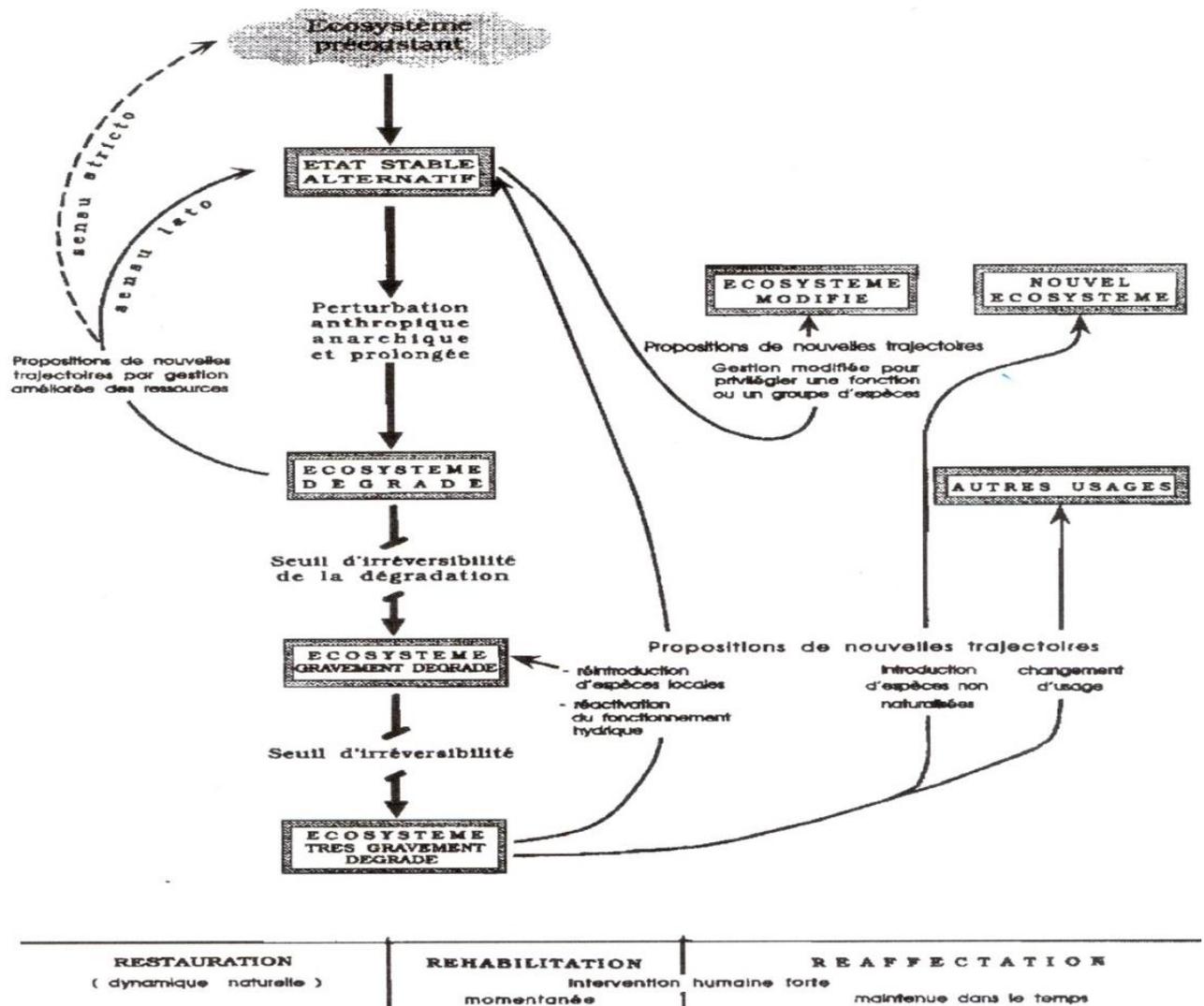


Figure 1 : Modèle de dégradation des écosystèmes et voies de restauration (Aronson *et al.*, 2010)

Valterra (2013) indique aussi que la construction d'un sol dégradé en sol végétalisé passe par la dépollution ou le terrassement, l'apport de la matière organique et la constitution du sol en couches agencées (Figure 2).

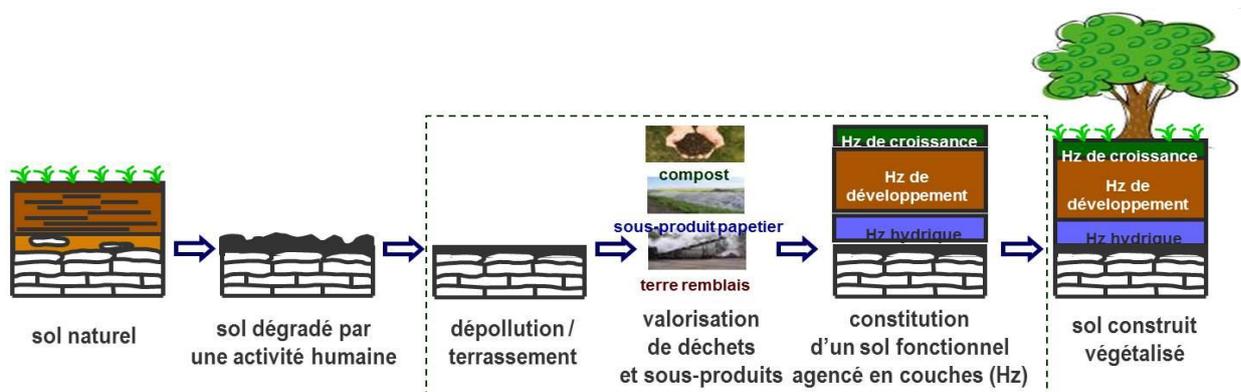


Figure 2 : Construction de sol

Le concept de construction de sol est une écotechnologie qui a pour objectif d'assurer la réhabilitation de sites dégradés en restituant au sol ses propriétés agronomiques, afin d'en permettre une revégétalisation. Ce procédé consiste en l'utilisation de sous-produits industriels et de terres traitées en lieu et place de terre végétale pour construire un sol fertile. Son originalité est d'associer ces matériaux pour constituer différentes couches de sol permettant une implantation optimale de la végétation. Une fois mis en place, le sol construit garantit la requalification du site. Les usages futurs peuvent être une intégration paysagère, la production de biomasse-énergie, la production agricole, etc. La lutte anti-érosive assure quant à elle la préservation des ressources naturelles notamment le sol. Dans les régions semi-arides, des mesures doivent donc être prises pour réduire les pertes en sol, en eau et en éléments nutritifs sur les sites érodés (De Graaff, 1997), ou sur les sites potentiellement exposés à l'érosion et les SCV sont donc tout indiqués pour inverser cette tendance à la dégradation.

1.5 Concept et principes des SCV

Un système de culture est un ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique : nature des cultures et les variétés, ordre de succession, itinéraires techniques appliqués (Sebillotte, 1982). Un itinéraire technique de production est une combinaison logique et ordonnée de techniques qui permettent de mieux contrôler le milieu biophysique afin de mieux produire. Par contre, un système de production agricole est un mode de combinaison entre terre, force et moyens de travail à des fins de production végétale et/ou animale, commun à un ensemble d'exploitations (Reboul, 1976). Le système de culture sur couverture végétale (SCV) est un système innovant dit de l'agriculture de conservation mis en œuvre en vue d'une production agricole satisfaisante et durable et où le sol n'est pas labouré et reste permanemment couvert d'une biomasse végétale. Séguy et Bouzinac (2000) définissent ce système comme un système conservatoire de gestion des sols et des cultures, dans lequel la semence est placée directement dans le sol, qui n'est jamais travaillé. Les avantages liés à la pratique des SCV sont entre autres l'apport en éléments nutritifs de la culture, la diminution de l'érosion et l'augmentation de l'infiltration, l'amélioration de la structure du sol, la diminution de l'évapotranspiration, la diminution de la

température du sol, la diminution de la propagation des mauvaises herbes. L'Agriculture de conservation repose sur 3 principes de base à l'échelle de la parcelle (AFD, 2006) :

Principe 1 : le sol n'est pas labouré

Le non travail du sol est observé afin de limiter les pertes de matière organique du sol par la minéralisation, favorisée par l'aération du sol. Lorsqu'un sol n'est pas travaillé pendant plusieurs années, la biomasse plus ou moins transformée (résidus de culture et de couverture) s'accumule pour former un *mulch* qui protège le sol contre l'érosion et les aléas climatiques (effet tampon). Le labour traditionnel utilisant la charrue est remplacé dans les SCV par le labour biologique réalisé d'abord par les systèmes racinaires qui édifient un environnement très favorable à la faune (vers, termites, etc.), laquelle parachève ensuite le travail biologique du sol. Divers organismes, depuis les insectes jusqu'aux bactéries et champignons microscopiques, trouvent un habitat et de bonnes conditions pour leur développement dans ce sol non travaillé. Grâce à leurs activités, ces organismes transforment, incorporent et mélangent le *mulch* au sol, puis vont décomposer l'ensemble ainsi constitué pour former l'humus. Tout d'abord, les champignons et la macrofaune du sol (vers de terre, ...), véritables « ingénieurs du sol », attaquent la lignine de la matière organique qui est ensuite dégradée par les bactéries. Cette macrofaune participe également à la formation d'agrégats et de galeries ou macroporosités du sol. Cette activité permet une distribution de la matière organique dans les différentes couches du sol et son mélange avec la matière minérale issue de la décomposition de la roche. Finalement, la structure du sol est améliorée et stabilisée. L'infiltration de l'eau est également facilitée, permettant ainsi de limiter le ruissellement et les risques d'inondation lors des averses.

Principe 2 : le sol est couvert de façon permanente par des végétaux

La couverture permanente du sol est pratiquée afin de le protéger de l'érosion éolienne en saison sèche et hydrique en saison pluvieuse ainsi que des températures excessives. Cette couverture à base de résidus de culture et/ou des plantes de service (plantes de couverture) constitue un apport important de carbone en surface qui va progressivement se décomposer et fournir de la matière organique et des nutriments au sol. La couverture permanente du sol est assurée par un *mulch* végétal vivant ou mort (paille). Elle peut se

faire en maintenant sur le sol des résidus de la culture précédente ou en installant des plantes de couverture (cultures intercalaires ou dérobées). Afin d'éviter toute compétition avec la culture principale, la plante de couverture est desséchée par la suite (fauchée, broyée ou herbicidee), ou gardée vivante et éventuellement contrôlée sous la culture par une application à faible dose d'herbicides. Ensuite, la biomasse n'est pas enfouie dans le sol mais est conservée en surface. Finalement, les semis sont réalisés directement dans la couverture végétale résiduelle, après ouverture d'un simple trou ou d'un sillon avec un semoir adapté (canne planteuse manuelle, simple bâton ou un semoir mécanique tracté ou attelé). Les plantes de couverture sont choisies en fonction de leur complémentarité avec la culture principale, de leurs possibles utilisations (alimentation humaine ou animale), mais surtout de leur rôle positif sur la fertilité du sol. Elles sont en effet soigneusement sélectionnées pour imiter le fonctionnement de l'écosystème forestier : elles doivent permettre la production rapide de biomasse et posséder un système racinaire pouvant atteindre les réserves en eau profonde du sol. Elles opèrent alors comme de véritables « pompes biologiques ».

Principe 3 : les rotations culturales sont pratiquées

Les rotations de cultures en particulier celles qui intègrent des légumineuses fixatrices d'azote sont fortement recommandées. Ces rotations sont importantes dans la lutte phytosanitaire intégrée dans la mesure où elles brisent les cycles des agents pathogènes. Les légumineuses (niébé, soja, crotalaire, etc.) qui rentrent en rotation culturale avec le coton et les céréales, permettent d'accroître la teneur en azote du sol à la faveur de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Le niveau de développement des racines est aussi pris en compte pour l'exploration des différents horizons du sol d'une campagne agricole à une autre. Pour valoriser davantage la parcelle, la plante de couverture est souvent mise en culture en association avec une céréale à l'exemple du sorgho et du *Brachiaria ruziziensis*. Toutefois, lorsque la teneur en minéraux du sol est faible, une fertilisation raisonnée est conseillée.

1.6 Concept, principes et lois de la fertilisation agricole

Les engrais sont des matières fertilisantes dont la fonction principale est d'apporter aux plantes un ou plusieurs éléments directement utiles à leur nutrition. Ils peuvent aussi être définis comme des substances destinées aux plantes par l'intermédiaire du sol ou des solutions nutritives et qui apportent un ou plusieurs minéraux jugés insuffisamment abondants pour accroître les rendements ou améliorer la qualité des récoltes. La fertilisation est donc l'apport des engrais aux sols pour améliorer les rendements des cultures. Le rôle des engrais consiste en effet à fournir ceux des éléments que la plante doit puiser, afin que le rendement de l'assimilation chlorophyllienne ne soit pas entravé. La fertilisation raisonnée est une des nombreuses composantes de l'agriculture raisonnée, où à partir des objectifs de production quantitatifs et qualitatifs, l'agriculteur calcule l'apport de fertilisants nécessaire pour compléter l'offre du sol en éléments minéraux et satisfaire les besoins nutritionnels des plantes. Bien que de moins en moins conseillée dans les systèmes agroécologiques, la fertilisation minérale a pour objet de corriger les carences en minéraux des sols et d'apporter à chaque culture, pour chaque parcelle, des éléments nutritifs nécessaires et efficaces, tout en réduisant les pertes d'éléments dans l'environnement. Le raisonnement de la fumure azotée par la méthode du bilan consiste à équilibrer les besoins totaux en azote du peuplement végétal par un stock d'azote disponible constitué par des fournitures du sol, des déjections animales et des fertilisants (UNIFA, 2005).

La fertilisation améliore donc la nutrition des cultures et favorise parallèlement l'expression de leurs génotypes. Elle permet ainsi de compléter la fourniture du sol en éléments minéraux pour des cultures au potentiel plus élevé, de compenser ce qui a été exporté, de conserver ou même de restaurer la fertilité du milieu et de restituer au sol les ressources exportées par les plantes (Latiri, 2002). Les matières fertilisantes regroupent en général les engrais et les amendements (organiques, calciques, magnésiens, ...). Les engrais verts sont par contre des cultures destinées à être enfouies dans le sol et peuvent être associées à la culture principale. Au début des années 1960, la consommation d'engrais dans le monde était de 31,2 millions de tonnes (Mt) répartis entre 27,5 Mt pour les pays développés et 3,7 Mt pour les pays en voie de développement. Depuis, cette

consommation a fortement augmenté, particulièrement dans les pays en développement, pour atteindre plus de 136 Mt par an en 2000, dont 49,8 Mt pour les pays développés et 86,6 Mt pour les pays en voie de développement.

Aussi, la moyenne mondiale de la consommation d'engrais par hectare de terre arable est-elle passée de 23,5 kg/ha en 1961 à 100,9 kg/ha en 2000. Cette augmentation s'est effectuée surtout dans les pays en développement, leur consommation ayant évolué de 6,2 kg/ha à 118,7 kg/ha, alors que pour les pays développés, la consommation a évolué de 40,4 kg/ha à 80,5 kg/ha (FAO, 2003). Ce qui se justifie par les faibles mesures de préservation de la fertilité des sols dans les pays en développement, avec des sols pour la plupart appauvris où il y a accroissement des besoins de nutrition des plantes. Le cas de certains pays comme les Pays-Bas fait exception, la consommation totale d'engrais par ha de terre agricole y était de 473,9 kg/ha en 1961, elle avait atteint 945 kg/ha dans les années 1980 pour de nouveau diminuer à 483,5 kg/ha de terre arable en 2000. Plus spécifiquement pour l'azote, de 1960 à 2000, la consommation mondiale en millions de tonnes est passée de 10 à 81 Mt/an, pour le phosphore la consommation a évolué de 10 à 32 Mt/an et pour la potasse de 8 à 22 Mt/an. Si on ramène la consommation à l'unité d'azote consommée, les ratios ont évolué de 1/1/0,78 en 1960 à 1/0,4/0,26 en 2000 (FAO, 2003).

L'augmentation de la teneur en éléments minéraux du sol peut parfois se traduire par la phytotoxicité ; ainsi, la croissance et le rendement des cultures se retrouvent affectés. Par rapport à la hausse de la teneur d'un élément minéral et l'évolution du rendement, Prevot et Ollagnier (1956) distinguent les phases de carence, de déficience, du niveau critique, de consommation de luxe, du début de toxicité et de toxicité. Pour assurer la protection de l'environnement, il est recommandé de minorer l'utilisation des engrais minéraux dont l'excès ou les mauvais usages peuvent se traduire par la pollution des sols, de la nappe phréatique et des cours d'eau (Hinimbio, 2016). En effet, les engrais à nitrates apportés (NO_3Na , NO_3Ca , NO_3Mg , ...) libèrent les nitrates NO_3^- qui sont faiblement fixés par le complexe absorbant, lequel ayant majoritairement les charges négatives ; ces nitrates non fixés sur ce complexe peuvent percoler en profondeur et parfois causer la pollution de la nappe phréatique.

La formulation d'engrais est faite sur une base de 100 kg et la législation indique que les teneurs minimales des 3 éléments majeurs N-P-K soient décrites par une succession de 3 nombres entiers dont le premier désigne le pourcentage d'azote (N), le deuxième le pourcentage de phosphore (P_2O_5) et le troisième le pourcentage de potassium (K_2O). Le reste constitue les adjuvants ou les charges qui peuvent être l'argile, la craie ou le sable fin. Toutefois, en plus des engrais ternaires N-P-K, on peut avoir les engrais simples à un seul élément majeur (N, P ou K), les engrais binaires à deux éléments (N-P, N-K ou P-K). La présence des autres éléments comme le Mg, le Ca et le B, est signalée par le signe + après NPK, soit par exemple 20-10-15+10Mg. La teneur en éléments nutritifs est au moins égale à 3% en masse pour l'un des trois éléments majeurs (N, P, K), leur somme doit être supérieure à 12% et cette teneur doit être conforme à la réglementation en vigueur. Sur les étiquettes ou sur les sacs, doivent être obligatoirement marqués : le nom de l'engrais, sa composition chimique, sa provenance industrielle, les teneurs déclarées en éléments fertilisants majeurs, leur forme et leur solubilité, le poids du sac, le nom et l'adresse du responsable ou de l'entreprise de la mise sur le marché. Dans certaines réglementations, sont exclus de la législation d'engrais les boues d'épuration, les déchets d'usinage et les produits organiques bruts tels que le fumier. Pour l'azote, on indiquera obligatoirement les formes sous lesquelles l'élément est présent car les différentes formes (ammoniacale, uréique ou nitrique) n'ont pas la même vitesse d'absorption.

Trois principales lois encadrent la fertilisation agricole :

- (i) la loi de la restauration ou de la restitution stipule qu'il faut restituer au sol les exportations des récoltes, des pertes par lessivage et les pertes incontrôlées pour préserver sa fertilité ;
- (ii) la loi de Liebig ou loi du minimum ou loi du facteur limitant fut énoncée en 1828 par Carl Sprengel puis adaptée et popularisée en 1850 par le chimiste organicien Allemand Justus Von Liebig [12 mai 1803 à Darmstadt – 18 avril 1873 à Munich]. Son énoncé : le poids de la récolte dépend uniquement du facteur nutritif le moins représenté dans le sol, c'est-à-dire le facteur limitant. Pour augmenter la récolte, il faut en premier lieu jouer sur ce facteur limitant. D'où la nécessité de connaître pour chaque sol et en fonction de la culture envisagée, le premier facteur limitant, puis le deuxième et ainsi de

suite. Comme critique de la loi de Liebig, on ne considère que les facteurs limitants par défaut, on n'envisage pas la possibilité d'une toxicité ou d'un excès. On attache au facteur limitant une importance exclusive sans tenir compte des autres facteurs.

(iii) la loi de Mitscherlich ou loi des rendements décroissants publiée en 1909 par le chimiste, minéralogiste et enseignant Allemand Eilhard Alfred Mitscherlich [7 janvier 1794 à Neuende, 28 août 1863 à Berlin]. Ce chimiste a effectué des recherches sur les composés à base de phosphore et d'arsenic et sur les dérivés du benzène et découvre en 1819 la loi de l'isomorphisme et du polymorphisme. Cette loi est aussi appelée loi des excédents de rendements moins que proportionnels et traduit l'augmentation du rendement d'une plante en fonction de la teneur du milieu en un élément nutritif. L'apport minéral est d'autant plus efficace que la carence est plus accusée, ce qui signifie qu'on est loin de la croissance maximale. La loi de Mitscherlich est appliquée au laboratoire pour l'étude expérimentale des états du sol. En effet, la croissance d'une plante ne résulte jamais de la variation d'un seul facteur isolé, car cette variation entraîne automatiquement celle d'autres paramètres. Les éléments nutritifs sont adsorbés et liés par les colloïdes du sol et leur mobilité est limitée. Pour occuper l'espace disponible, il y a une compétition entre les ions présents ; et entre les cations, les substitutions sont possibles. La nature et la proportion des éléments présents influencent la viscosité, la salinité et la pression osmotique. Lorsqu'un élément domine le milieu, il déplace les autres en agissant défavorablement sur eux. Il devient ainsi plus ou moins toxique et peut entraîner la baisse des rendements. Cette loi montre également l'existence, pour une culture spécifique sur un sol donné : un rendement maximum théorique, un rendement optimum économique et la limite de rentabilité.

1.7 Théories en gestion de la fertilité des sols

Les différents concepts liés aux sols, à leur dégradation et leur gestion, nous orientent vers des théories qui encadrent l'utilisation raisonnée et durable de ces sols. Il s'agit entre autres des théories de bio-rhexistasie, de l'inadaptation des méthodes agricoles, de perturbation de l'équilibre d'un sol et de gestion intégrée de la fertilité d'un sol.

1.7.1 Théorie de la bio-rhexistase

Le terme bio-rhexistase a été créé en 1951 par un spécialiste des sols, Henri Erhart [1898-1982], par la contraction de deux termes, biostase et rhexistase qui servent à désigner deux états des sols. La biostase est l'état d'équilibre atteint par le sol, la végétation et le climat quand le sol porte depuis longtemps une forêt ayant atteint son plein développement : il existe essentiellement ici une altération chimique et biologique. La rhexistase est l'état qui suit la biostase lorsque l'équilibre existant est détruit pour une raison ou une autre : l'altération est essentiellement physique et Boucif (2011) indique que cet état correspond à un contexte d'érosion dominante où la végétation en place peut être déchaussée. L'histoire des sols est donc étroitement liée à la succession de ces deux états (Erhart, 1951). Erhart est arrivé à cette conception par l'observation de la répartition des forêts denses sur le globe et des sols qui les supportent (Durand, 1957). En effet, Erhart a mis en évidence le rôle déterminant du climat et du couvert végétal dans l'altération des roches, et donc dans la formation des sols, avec sa théorie de la bio-rhexistase. En période de stabilité climacique (biostase), la végétation couvre les sols. L'érosion mécanique est faible, l'altération est principalement chimique. Les eaux de drainage sont peu chargées en particules, elles entraînent vers les océans des cations (issus de l'altération des silicates) et des composés biologiques solubles qui vont donner, par sédimentation ou précipitation, des dépôts fins (argiles, calcaires, ...). En période de déséquilibre (rhexistase) la végétation disparaît, les sols sont érodés, les dépôts lacustres ou marins sont alors constitués de matériaux détritiques grossiers. Des sédiments ferrugineux et bauxitiques apparaissent tandis que les dépôts calcaires et organiques diminuent. Ainsi, Erhart fait-il le lien entre pédogenèse et sédimentogenèse marine. Ce modèle s'applique aux différents biomes : forêt boréale, tempérée et équatoriale, steppes et savanes. Mais il n'explique pas les raisons des déséquilibres qui peuvent affecter la couverture végétale à l'échelle continentale (incendies majeurs, changements climatiques, ...). La stratification de certains dépôts lacustres ou marins semble corroborer sa théorie : matériel fin puis charbon (résidus de la couverture végétale), enfin matériel plus grossier.

1.7.2 Théorie de l'inadaptation des méthodes agricoles

L'emploi de moyens mécanisés de plus en plus puissants dans le labour des terres agricoles (Figure 3) fait saigner la terre ; ceci conjugué à l'épandage à forte dose des fertilisants et des pesticides sur plusieurs années. Cette méthode issue de la révolution verte promue par la reconversion de l'industrie chimique des explosifs de guerre à l'issue de la seconde guerre mondiale, a provoqué la destruction des micro-organismes telluriques ; ce qui est une cause de la dégradation des sols, constatée dans la plupart des pays. Ce que relèvent aussi Donfack et *al.* (1988) qui confortent cette théorie en notant que des modes souvent inadaptés de gestion de l'espace rural en zone aride occasionnent une détérioration du milieu naturel.



Figure 3 : Labour profond et destructeur du sol

Le microbiologiste, œnologue et agronome Français, Claude Bourguignon, chercheur à l'INRA, soutient que la nature a créé des sols pérennes depuis des millions d'années, et que les principales causes de l'érosion des sols et de la désertification, sont leur destruction par les méthodes agricoles de l'homme (Bourguignon et Lydia, 2008). Selon lui, l'érosion des sols et la perte des rendements agricoles ont été par exemple une cause essentielle de la chute de l'Empire romain. Selon cette théorie, un sol ne devrait jamais être labouré. En effet, la nature ne laboure jamais et crée les sols par dépôt de couches successives. Le labour crée l'érosion, tue la faune aérobie de surface en l'enterrant, et limite les mécanismes naturels de formation d'humus qui nécessitent la présence d'air. La semelle de labour ajoute ses effets à ceux du compactage des sols. L'excès des produits chimiques conduit souvent à la pollution et l'intoxication des

végétaux. Pour donc lutter contre ces effets néfastes, il convient avant tout de mettre fin à l'hérésie du labour, puis de relancer les mécanismes biologiques du sol, en le rééquilibrant et en lui redonnant de quoi créer son humus sous forme d'un apport organique (AFES, 2008).

1.7.3 Théorie de perturbation de l'équilibre d'un sol

Lorsque l'état d'équilibre (climax) est atteint, le sol est théoriquement stable dans le temps et tend à accumuler de la matière organique. La végétation et la microfaune du sol produisent l'humus et assurent la circulation ascendante des matières. L'humus et la couverture végétale protègent le sol contre l'érosion pluviale, la déshydratation et le vent. Les plantes, les bactéries et certains micro-organismes du sol réduisent aussi l'érosion en liant les particules du sol entre elles et aux racines grâce aux complexes argilo-humiques et à divers mucus ou mucilages sécrétés par les organismes du sol. Ainsi, toute modification légère est rapidement corrigée et l'équilibre se trouve rétabli. La perturbation subie par l'écosystème peut ne pas permettre la résilience du système à échelle humaine. Toutefois, l'érosion du sol peut être plus rapide que le processus de formation des horizons supérieurs du sol : il y a ainsi rajeunissement, involution ou régression du sol. Un défrichement de sol en pente, suivi de fortes pluies peut conduire à la destruction complète du sol. À Madagascar par exemple, des épaisseurs de 3 à 4 m de sol sont parfois emportées après déforestation, en une saison des pluies là où le sol forestier avait mis des millions d'années à se constituer (AEE, 1995).

La dégradation du sol est directement liée aux activités humaines, notamment agricoles. Le remplacement de la végétation primitive climacique par une végétation secondaire, modifiant les processus de pédogenèse, est l'une des principales perturbations anthropiques. Pour illustration, le remplacement de forêts de feuillus par des landes ou des plantations de pins est source d'acidification, de podzolisation et de dégradation des sols et de l'eau. À cela s'ajoute la hausse considérable de l'érosion, qui est maintenant le principal facteur de la dégradation physique des sols. L'agriculture non raisonnée augmente les risques d'érosion en perturbant la végétation locale. Parmi les pratiques perturbant l'équilibre des sols, on distingue : le surpâturage (y compris en forêt), la monoculture, la culture en rangs espacés (maïs industriel, vigne) sans couvert végétal,

le labour, le sol nu, le défrichage et la déforestation de grandes parcelles pour augmenter la surface agricole, le sillon dans le sens de la pente, l'usage excessif d'intrants (engrais, insecticides, herbicides, etc.), le tassement du sol par l'usage d'engins agricoles lourds, les coupes rases abusives, le ratissage des litières, l'usage répété et à large échelle du feu. L'INRA (2008) relève d'ailleurs que la surexploitation des forêts, la fertilisation minérale excessive ainsi que l'usage excessif des produits phytosanitaires assurent la perturbation de l'équilibre des sols, avec parfois la pollution des cours d'eau et l'eutrophisation des mers.

1.7.4 Théorie de la gestion intégrée de la fertilité des sols

La gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS), requiert une combinaison d'actions en faveur de la conservation de la fertilité des sols notamment le maintien d'un niveau satisfaisant du statut organique du sol, la lutte anti-érosive, l'assolement, la rotation culturale et la minoration de l'usage des engrais minéraux et des pesticides au seuil ne pouvant entraîner la pollution ni la destruction de la pédofaune. Les connaissances en chimie agricole commandent le perfectionnement des assolements, qui sont en effet, parmi les moyens possibles, les plus généralisables pour le maintien et l'accroissement de la fertilité. Les assolements sont donc conçus de telle façon que la quantité de fumier obtenue dans la ferme permette la fumure de tous les hectares consacrés aux cultures. D'où l'adage bien connu à l'époque en France : veux-tu du blé ? Fais des prés (Géraud, 1995). En effet, il existe pour chaque culture, notamment les céréales, un rendement optimal qu'il est nécessaire d'obtenir au point de vue économique. L'obtention de ce rendement exige une fertilisation organique minimale. Cette quantité de fumier demande à son tour la présence d'un certain effectif de bétail et, pour nourrir celui-ci, une certaine superficie doit être consacrée aux fourrages. D'où un équilibre entre cultures céréalières et fourragères, à répartir et à faire alterner selon un assolement à déterminer.

L'assolement et la rotation culturale désignent en effet la liste chronologique des espèces cultivées qui se succèdent de façon répétée, avec l'indication des principales opérations culturales et du moment où on les réalise. La répartition des surfaces correspondant à cette succession temporelle est parfois aussi indiquée. L'assolement est la division des

terres d'une exploitation agricole en parties distinctes, appelées soles ou pies, consacrées chacune à une culture donnée pendant une saison culturale. Dans chaque sole, les cultures peuvent varier d'une année (voire d'une saison) à l'autre : c'est la succession culturale ou rotation. L'assolement est la diversité géographique des cultures à un moment donné, la rotation est la succession ordonnée des cultures sur une même parcelle au fil du temps. Les 3 règles de base de la rotation : une culture peu exigeante après une culture exigeante ; deux cultures à différentes profondeurs d'enracinement pour mieux explorer les horizons du sol, et enfin une culture de famille botanique différente de celle qui l'a précédée. L'assolement d'une exploitation agricole résulte de différentes contraintes, tant agronomiques qu'économiques, et cherche à optimiser le résultat global en gestion de la fertilité des sols et même le contrôle des ravageurs. Enfin l'agriculteur doit prendre en compte dans cette gestion les moyens humains, en quantité et en qualification. On peut en outre adopter une sole de jachère dans la rotation. La jachère se caractérise entre autres par sa durée, qui peut aller de quelques mois à plusieurs années et la jachère naturelle peut aller au-delà de 20 ans pour une meilleure régénération du statut du sol. La lutte anti-érosive peut porter quant à elle sur la mise en place dans les parcelles des bandes végétales (herbacées ou arbustives), des cordons pierreux, des biefs, des bourrelets, etc.

Chapitre 2 : Revue de la littérature

Les types des sols et leurs caractéristiques permettent avec les conditions pédoclimatiques de déterminer le potentiel de production d'une culture dans un milieu donné, ce qui est désigné évaluation des terres. Les sols peu productifs ou dégradés peuvent ainsi faire l'objet de la régénération de leur fertilité à travers le SCV ou même le fumier, le compost ou l'engrais vert. La fixation symbiotique de l'azote participe aussi à relever le niveau de fertilité d'un sol.

2.1 Composition, profil et propriétés d'un sol agricole

Yerima (1988) indique qu'un sol agricole à composition idéale et à texture moyenne comporte en volume : (i) 50% de solides dont 45% de matière minérale et 5% de matière organique et (ii) 50% de fluides dont 25% d'eau et 25% d'air. Toutefois, peu de sols au Nord-Cameroun se rapprochent de l'idéal notamment en ce qui concerne de la teneur en matière organique, qui est généralement inférieure à 3%. Le profil pédologique d'un sol est la section verticale du sol montrant les différents horizons tandis que le profil cultural, qui comporte le lit de semence, la couche arable et le sous-sol, désigne l'ensemble des couches de terres touchées par les travaux culturaux et l'action des racines. Un sol est caractérisé par des propriétés physiques (texture, structure, perméabilité, teneur en eau, etc.), des propriétés chimiques (minéraux constitutifs) et des propriétés biologiques (organismes telluriques présents). La texture d'un sol est la composition granulométrique de la terre fine en sable, limon, argile dont les particules ont moins de 2 mm de diamètre. Selon le diamètre (Φ), la terre fine est répartie en :

$\Phi < 0,002$ mm :	argile
$0,002 < \Phi < 0,02$ mm :	limon fin
$0,02 < \Phi < 0,05$ mm :	limon grossier
$0,05 < \Phi < 0,2$ mm :	sable fin
$0,2 < \Phi < 2$ mm :	sable grossier.

La structure d'un sol quant à elle est le mode d'agencement des particules entre elles. Les constituants du sol sont donc organisés entre eux, verticalement et latéralement, formant des structures qui sont spécifiques du milieu du sol : c'est la morphologie de la couverture pédologique. Ces structures sont le résultat de l'histoire de la formation des

sols, mais aussi de leurs propriétés et dynamiques actuelles (CIRAD-GRET, 2002). Il existe deux principaux types de structures : les structures fragmentaires où il y a des agrégats (arrondis, anguleux ou feuilletés) et les structures continues (particulaire ou massive), sans agrégats.

L'eau du sol est chargée des minéraux et constitue ainsi la solution nutritive du sol pour les plantes. L'eau est la substance moléculaire la plus abondante dans les cellules végétales en pleine croissance ou en pleine activité métabolique. Elle représente 70 à 90% du poids frais de la plupart des cellules et tissus des végétaux (Nguy Ntamack, 2001).

Le sol abrite partiellement ou complètement la plus grande diversité d'organismes vivants (Citeau *et al.*, 2008) notamment de nombreuses espèces animales et végétales. Beaucoup d'organismes vivants participent à l'équilibre biologique de l'écosystème du sol dont : la macrofaune (vers de terre, termites, fourmis, myriapodes, larves d'insectes, etc.), la mésofaune (acariens, symphytes, collemboles, etc.) et la microfaune ou microorganismes (bactéries, actinomycètes, champignons, algues unicellulaires, etc.). La diversité biologique (nombre et abondance des espèces, diversité génétique et proportion de chaque espèce) des sols est largement méconnue ; ce qui fait appeler le sol par certains chercheurs « un continent inexploré ». Tout un orchestre d'organismes vivants s'accorde donc à faire vivre le sol. L'activité biologique est ainsi le moteur de la formation des horizons pédologiques. Les microorganismes représentent 90% en masse des organismes vivants dans le sol et sont impliqués dans la plupart des fonctions clés du sol et 1 g du sol contient 10^9 bactéries (Citeau *et al.*, 2008). Le sol n'existe pas sans activités biologiques abondantes et diversifiées (CIRAD-GRET, 2002), notamment la minéralisation des composés carbonés et azotés. Dans un mètre carré de sol de prairie permanente vivent en moyenne 260 millions d'êtres vivants, soit 1,5 t ; l'équivalent en poids de deux vaches sous terre. Les habitants du sol assurent un recyclage hors pair. Ces organismes participent en effet à la décomposition de la matière organique en humus puis à sa minéralisation. Les éléments minéraux ainsi produits contribuent à nourrir les végétaux. De plus, ils mélangent le sol améliorant ainsi son aération, sa texture et sa structure. Ces activités ne sont pas seulement essentielles au fonctionnement des

écosystèmes naturels ; elles constituent également une ressource importante pour la gestion durable des systèmes agricoles en améliorant la santé des végétaux.

La chimie des sols comprend l'étude systématique des ions du sol dont l'ion H^+ , qui occupe une place importante dans la catégorie des ions échangeables puisqu'il détermine le pH des sols. Le pH d'un sol ou potentiel hydrogène reflète le caractère acide, neutre ou basique d'un sol et définit la concentration d'ions H^+ dans la phase liquide du sol (Giasson et Jaouich, 2008). Il s'agit en effet du logarithme de l'inverse de la concentration d'ion H^+ en g/l que l'on représente habituellement par :

$$pH = \log 1/[H^+]$$

Il varie de 0 à 14 mais est habituellement situé entre 4 et 8 pour les sols. Le $pH = 7$ lorsque $[H^+] = [OH^-]$ et le sol est donc neutre. Il est un indicateur du niveau général du sol en éléments chimiques assimilables. Le pH du sol se trouve en relation directe avec les cations et les anions échangeables. C'est la propriété chimique du sol qui est la plus mesurée à l'heure actuelle. Le pH H_2O (eau) mesure l'acidité de la solution du sol, tandis que le pH KCl (Chlorure de potassium) mesure l'acidité en réserve sur le complexe argilo-humique, les ions H^+ du complexe sont ainsi remplacés par des ions K^+ (Figure 4). Le pH KCl est donc toujours inférieur au pH eau. La différence ($pH H_2O - pH KCl$) varie en général de 0,5 à 1,5 et est évidemment proportionnelle à l'acidité de réserve du complexe argilo-humique (Giasson et Jaouich, 2008). Ce qui est confirmée dans la plupart des échantillons de sols de cette étude dont la différence varie de 0,70 à 1,07 à Kodek et de 0,31 à 0,94 à Zouana, avec une seule valeur (0,31) qui s'écarte de l'intervalle défini par Giasson et Jaouich (2008).

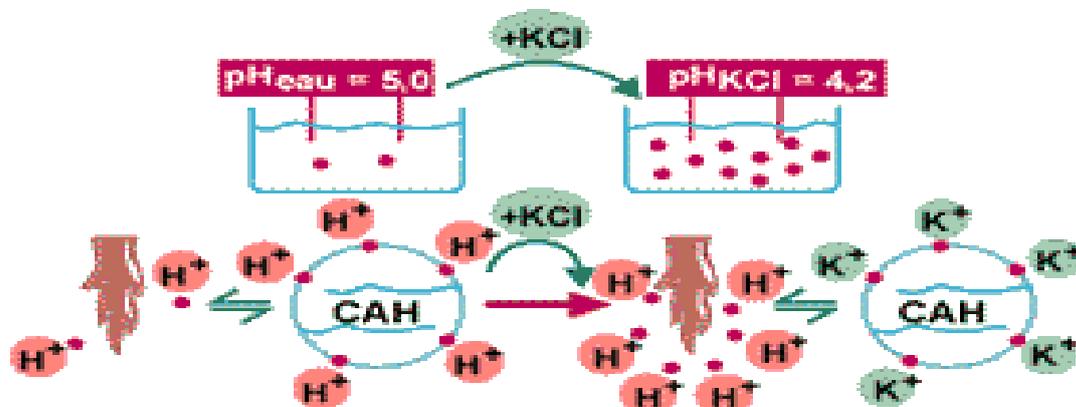


Figure 4 : pH H_2O et pH KCl
(Giasson et Jaouich, 2008)

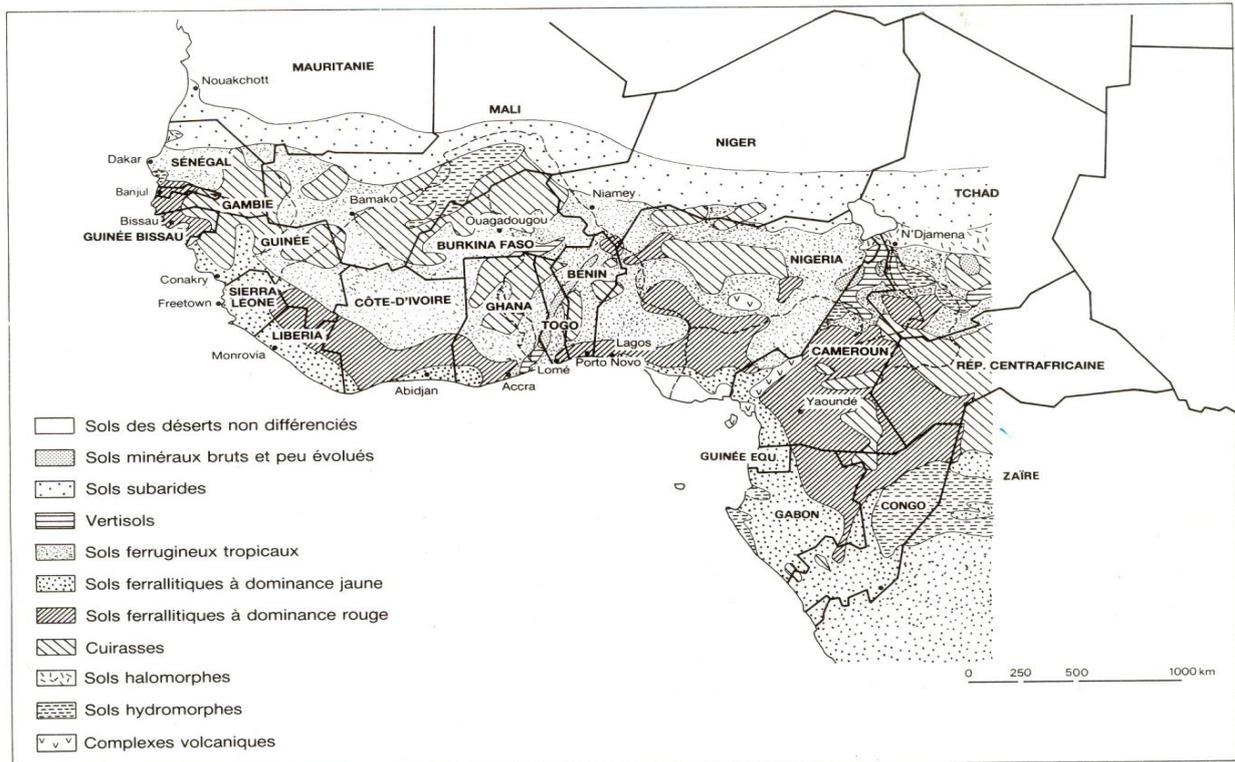
L'échange cationique ou anionique consiste donc dans la fixation de cations ou anions sur les particules solides des sols et leur libération subséquente sans altération sensible. Les cations échangeables dominants sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, H^+ , Mn^{2+} et Fe^{2+} . Les 4 premiers cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) sont appelés bases échangeables. La capacité d'échange cationique est donc déterminée par le déplacement des cations échangeables ou par un cation indicateur, utilisé pour la saturation des sites d'échanges (Giasson et Jaouich, 2008). La CEC des minéraux argileux et de la matière organique est présentée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Capacité d'échange de minéraux argileux et de matière organique (SCSS, 2000)

Minéraux argileux et matière organique	Capacité d'échange (méq/100g)
Kaolinite	3-15
Halloysite	5-50
Montmorillonite	8-150
Illite	10-40
Chlorite	10-40
Vermiculite	100-150
Matière organique	100-250

2.2 Types des sols au Nord-Cameroun

La majeure partie des sols d'Afrique Centrale et Occidentale, est formée sur le socle granito-gneissique précambrien très aplati, ou sur les dépôts continentaux sableux ou gréseux situés souvent plus au Nord. Le matériau originel de la plupart des sols au Nord-Cameroun provient des roches contenant du fer et susceptibles de fournir un résidu d'altération sableux et quartzeux assez abondant (Brabant, 1991b). Le sol observé sous la forêt claire du Nord-Cameroun est un sol ferrugineux tropical dans la classification du CPCS, un alisol dans le système utilisé dans la légende FAO (1988) et un haplustalf dans le *Soil taxonomy*, USDA (Brabant, 1991a). Les différents types de sols de l'Afrique centrale et occidentale sont représentés à la figure 5. ILTA (1984) caractérise l'agroclimat de cette zone comme celui dont l'agriculture est très sensible à la sécheresse (Figure 6). L'alternance très contrastée de climats humides et semi-humides a fait évoluer la roche mère (Pieri, 1989).



Source : D'HOORE, 1964 ; travaux ORSTOM.

Figure 5 : Esquisse pédologique de l'Afrique centrale et occidentale

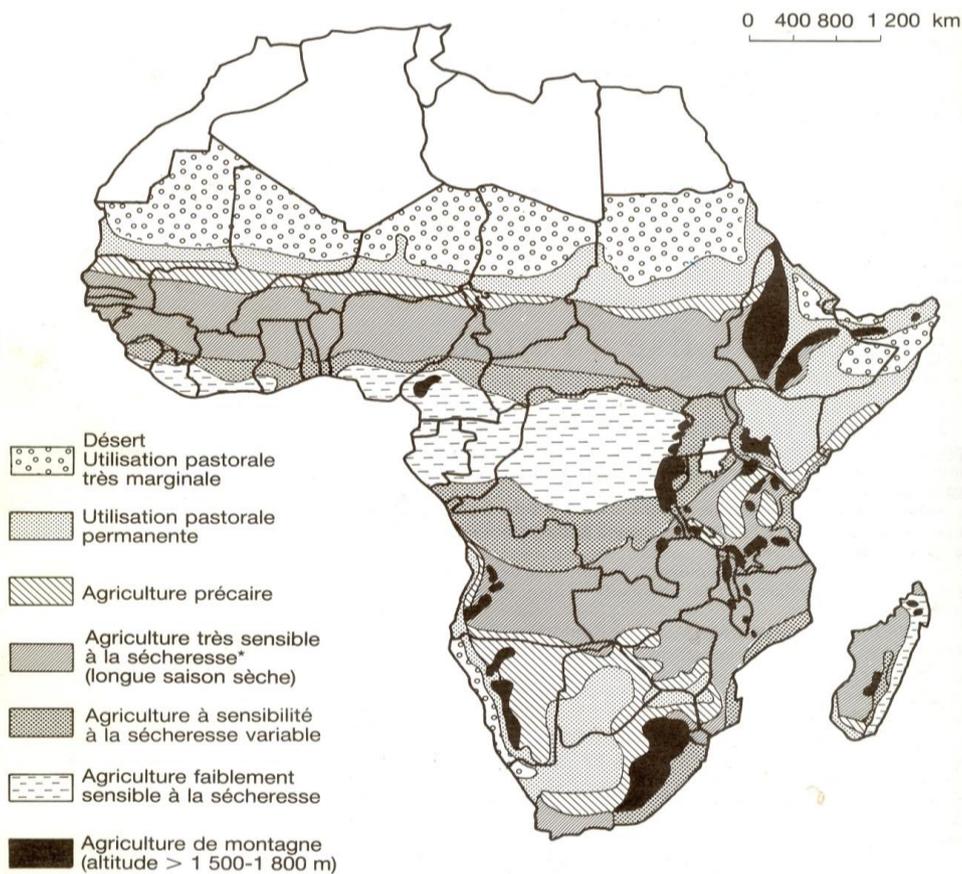


Figure 6 : Grandes zones agroclimatiques de l'Afrique (ILTA, 1984)

La zone cotonnière au Nord-Cameroun, présente un climat soudanien, avec la présence des savanes et une pluviométrie variant entre 600 et 1200 mm. Les pénéplaines et les pédiplaines constituent le relief dominant. C'est une zone dont les sols se prêtent plus ou moins favorablement à l'agriculture, mais aussi à l'élevage, en raison de son aptitude naturelle à produire les espèces herbacées, pour la plupart fortement appréciées par les animaux. Segalen (1967) relevait que les sols que l'on observe entre l'Adamaoua et les Monts Mandara résultent des influences du climat, du faible enfoncement du réseau hydrographique, et de la très grande platitude du relief se traduisant souvent par un drainage médiocre. Ils sont dans l'ensemble peu profonds, marqués surtout par l'hydromorphie, l'appauvrissement d'une partie importante du profil en fer et argile, et une redistribution du fer qui peut s'accumuler dans des zones basses pour former des cuirasses ferrugineuses. L'aperçu des sols à utilisation agronomique au Nord-Cameroun effectué par l'ORSTOM (1980) les organise en 5 types : (i) les sols peu évolués d'apport (alluvions) autour des mayos ou d'érosion sur les monts ; (ii) les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur socle (zone de Béré), lessivés sur sable dunaire (zone de Kalfou), lessivés indurés en profondeur (zone de Touboro) ou lessivés hydromorphes, engorgés en saison pluvieuse (zone de Badjouma) ; (iii) les sols *hardés* (zone de Godola) ; (iv) les vertisols (dans tous les bas-fonds notamment la plaine du Lac Tchad dont Waza, Kodek, Zouana) et (v) les sols rouges tropicaux (zone de Guider).

Ces différents sols reposent sur une roche mère composée de granite du même socle continental africain ; les sols tropicaux rouges sont par contre développés sur une roche mère d'origine volcanique récente. Les sols sont donc répartis suivant la pente selon un ordre fixe (du massif granitique au cours d'eau) pour tout le bassin du Lac Tchad : les sols jeunes, les sols lessivés, les *hardés*, les vertisols et les alluvions (Brabant, 1991a).

2.2.1 Sols peu évolués d'apport

Les sols peu évolués sont des sols jeunes qui se distinguent par une faible altération des minéraux et une faible teneur en matière organique laquelle se superpose généralement au substrat minéral sans former de complexes organo-minéraux. Ces sols ont des origines diverses liées au climat, à l'érosion ou encore aux apports extérieurs. Les sols peu évolués d'apport, contrairement aux podzols qui sont des sols très évolués

rencontrés en climat froid, sont très hétérogènes du fait de leur origine, avec des horizons souvent superposés et distinctifs. Les podzols, originellement filtrants, pauvres en argiles et en bases, sont facilement atteints par le lessivage, qui se traduit par une dégradation des qualités du sol, connue sous le terme de podzolisation. Selon leur texture, les sols peu évolués d'apport sont sableux, sablo-argileux, argilo-sableux ou argileux. Leur aptitude culturale (capacité à fournir aux plantes les éléments nécessaires à sa croissance et à son développement : eau, air, minéraux, ...) est élevée parce qu'ils sont bien pourvus en éléments minéraux, bien que la texture soit un facteur limitant. Ils conviennent donc à la plupart des cultures, bien que généralement graveleux et constitués des premiers éléments de dégradation du granite, à texture sableuse grossière. Ils sont développés sur pente, donc très sensible à l'érosion et sont généralement pauvres en éléments fertilisants, avec un taux de matière organique faible. Ils conviennent aux sorghos notamment *Pennisitum typhoides*.

Les sols peu évolués d'apport alluvial sont des sols, non inondables, qui ne sont marqués par aucune pédogenèse caractéristique soit des ferrugineux tropicaux, soit des vertisols, soit des planosols. Les planosols ont généralement une structure prismatique ou en blocs et les revêtements d'argile y sont bien visibles, avec parfois une réaction légèrement alcaline et peuvent contenir une certaine proportion de sodium échangeable. Les planosols sont définis principalement par leur morphologie différenciée (granulométrie, structure, perméabilité), elle-même étroitement liée à un type particulier de fonctionnement hydrique. Dans tous les cas, un grand contraste existe entre des horizons supérieurs perméables qui sont saisonnièrement le siège d'engorgements et présentent donc des caractères d'oxydo-réduction marqués, et un horizon plus profond dont la perméabilité est très faible ou nulle appelé plancher (Raunet, 2003). Au Nord-Cameroun, on trouve essentiellement les sols peu évolués d'apport au Nord du Mayo de la Tsanaga incluant la zone de Kodek.

2.2.2 Sols ferrugineux tropicaux

Les sols ferrugineux se forment essentiellement dans les régions où règne une très longue saison sèche et sur un pédoclimat de savane à graminées, c'est-à-dire en Afrique tropicale, en Amérique centrale ou en Asie méridionale. Ces sols sont riches en fer, en

argile (la kaolinite notamment), mais pratiquement, voire totalement dépourvus d'alumine libre. L'horizon supérieur est peu épais, riche en matières organiques et en minéraux. Il surmonte un horizon éluvial et un horizon Bt enrichi en colloïdes argileux, entraînés par lessivage. Si ces sols se révèlent peu sensibles à l'action humaine, il n'en va pas de même de leurs couvertures végétales qui, suite aux cultures sur brûlis, sont profondément et durablement appauvries.

Les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur socle sont généralement de couleur rose, très perméables, à texture sablo-argileuse (avec environ 10% d'argile). Les sols ferrugineux tropicaux lessivés proviennent des précédents par lessivage de fer et d'argile (où il n'en reste que 5%) ; à texture sableuse et à couleur rose plus claire, ils se développent sur les anciennes dunes du Lac Tchad. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés en profondeur se distinguent des précédents par un lessivage important du fer, qui en s'accumulant, forme un horizon dur appelé cuirasse. De couleur grise et rouge à l'approche de la cuirasse, leur texture est généralement sablo-argileuse.

Les sols ferrugineux tropicaux sont en général fertiles mais cette fertilité diminue avec le lessivage d'une part et l'hydromorphie d'autre part. Leur réponse aux engrais est très bonne et ils conviennent à la plupart des cultures ; les plus lessivés conviennent aux sorghos et à l'arachide et les plus hydromorphes au riz. Raunet (2003) trouve que les sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes, associés aux vertisols et aux planosols, représentent une surface importante des glacis d'épandage (hors glacis de piémont). Ils sont formés sur l'épais remblaiement colluvio-alluvial (parfois jusqu'à 10 à 20 mètres), issu de l'érosion d'altérites préexistantes, recouvrant le substratum granito-gneissique aplani. Ces matériaux, à héritage lithologique du socle, sont, dans ce cas, ni riches en feldspaths sodiques qui donnent des planosols, ni riches en minéraux ferromagnésiens (qui donnent des vertisols). Autrement dit, en règle générale, si, sur les glacis de l'Extrême-Nord, les sols ne sont ni des planosols halomorphes (« *hardés* » *sensus stricto*) ni des vertisols, deux catégories sont somme toute assez bien identifiables en surface, on peut dire que ce sont des sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes (ou carrément des sols hydromorphes s'ils sont très gris ou tachetés).

Le matériau de remblaiement d'origine est à dominance argilo-sableuse avec des passages de sables grossiers et de graviers. La pente est faible (de l'ordre de 0,5 – 2 %) le glacis est drainé par des *mayos* sableux, encaissés de 1 à 3 mètres et coulant par intermittence. Ces sols ont une texture limono-sableuse à limono-argilo-sableuse dans leur partie supérieure (0 – 50 cm) avec 15 à 20 % d'argile passant progressivement à argilo-sableuse (20 à 40 % d'argile) en profondeur. Une « semelle sableuse » arénique (quartz + feldspath non sodique) du matériau colluvial est souvent présente en profondeur (1 à 2 mètres) et occupée par une nappe perchée. Leur structure est le plus souvent massive, on parle alors de « prise en masse » : en effet le sable quartzueux est pris dans un ciment argileux à base de kaolinite et d'illite donc non gonflant. Les fissures, quand elles existent, sont fines. La couleur d'ensemble est brun-grisâtre à grisâtre, au-dessus, brun-jaunâtre en profondeur, à taches diffuses d'oxydes de fer (goethite) brunes à rouille en forme fréquente de traînées verticales.

Une nappe phréatique perchée, probablement lenticulaire, logée dans les couches inférieures ou profondes plus sableuses du remblaiement colluvio-alluvial, remonte et fluctue jusque vers 30 cm de la surface. Ces sols sont donc marqués par un régime hydrique très contrasté avec un engorgement temporaire et discontinu qui sature le matériau en hivernage, avec battement vertical puis écoulement oblique et latéral dans les 50 centimètres supérieurs du fait du colmatage argileux et de la faible perméabilité du sous-sol. Cet inféro- flux ou nappe perchée circulante entretient le lessivage des colloïdes (rétroaction positive). Cet engorgement provoque une redistribution du fer (fer ferreux soluble vers fer ferrique immobilisé en oxydes), en larges taches de goethite, horizons qu'on appelle pseudogley. Ces sols sont pauvres chimiquement, avec un taux de matière organique en surface (0 – 20 %) de l'ordre de 1 %. Le pH est compris entre 5,5 et 6 en profondeur comme en surface. La capacité d'échange est de l'ordre de 4 à 8 méq % ; elle est saturée à 30 – 50 %. Dans bon nombre de cas, il est erroné de parler de sols ferrugineux tropicaux. Il s'agit carrément de sols hydromorphes lessivés à pseudogley. Les couleurs sont grisâtres à brun-grisâtre ou jaune-grisâtre. Elles ne sont jamais dans la gamme des rouges, ce qui prouve que, sur ces glacis à pente faible, le drainage interne est toujours déficient et le drainage externe lent.

Lorsqu'ils ont été cultivés, l'érosion en nappe est forte sur ces sols avec localement glaçage et colmatage de la surface, donnant le faciès des sols dégradés. Les sites SCV/ESA de Mbozzo (18 km) et Zamay (60 km) à l'Ouest de Maroua sont sur ces types de sols. Des variantes existent à l'intérieur de cette catégorie de sols. Il en est ainsi des sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes carapacés ou gravillonnaires. Ce sont des sols dont la zone tachetée « plinthite », signe d'une fluctuation de la nappe phréatique avec hydromorphie saisonnière et avec redistribution du fer en taches et traînées rouille, s'est indurée par anastomose des taches ou évolution de ces dernières en gravillons ferrugineux plus ou moins soudés. Cette zone carapacée ou gravillonnaire peut se situer entre 20 et 80 cm de profondeur et être épaisse de 40 à 100 cm. Au-dessus, on a un limon sableux grisâtre, au-dessous une argile sableuse à gros grains de quartz et de feldspath restant humide ou fraîche en saison sèche. Le site de Zouana représente ce type de sol qui paraît cependant relativement peu répandu.

2.2.3 *Hardés*

Les *hardés* sont des sols caractérisés par la superposition d'un horizon sableux de surface et d'un horizon argileux dur et imperméable. Les sols *Hardé* sont couverts d'une rare végétation arborée, avec parfois une couverture herbacée inexistante (Gavaud, 1971 et Seignobos, 1993). Un sol *hardé* est constitué d'une très légère couche humifère sur l'horizon de surface, qui couvre une couche très compacte (20 cm à 30 cm), imperméable à l'eau et qui inhibe la croissance des racines des plantes (Gavaud, 1971). Ces sols sont très sensibles à l'érosion, sont acides ($5 < \text{pH} < 6$), avec des bases échangeables dont la CEC est comprise entre 5 et 10 méq/100g. Par contre, les vertisols dégradés ont un pH proche du neutre, avec une CEC pouvant atteindre 35 méq/100g (Seiny-Boukar et Pontanier, 1993). Leur texture est sablo-argileuse en surface. En profondeur, l'argile tend à s'accumuler et bouche les pores. Leur teneur en matière organique est faible variant de 0.5% à 1% (Brabant et Gavaud, 1985). Leur humidité dépasse rarement 25 cm et leur disponibilité en eau pour la végétation se situe entre deux à trois mois sur l'ensemble de leur profil (Seiny-Boukar et Pontanier, 1993).

De couleur gris clair, les *hardés* sont en général stériles à la production agricole du fait de la compacité de l'horizon argileux ; l'apport d'engrais y étant peu efficace. Toutefois,

Fotsing et Mainam (2003) indiquent que dans la plaine du Diamaré, certains *hardés* sont toujours utilisés pour la culture du sorgho de contre-saison, avec la pratique des aménagements en diguettes. Aussi, la réhabilitation agroécologique est bien indiquée pour la remise en valeur des hardés à travers par exemple les mélanges restaurateurs en système de culture sur couverture végétale (SCV). Ainsi, l'association *Brachiaria ruziziensis* et *Crotalaria juncea* en première année de culture, assure le travail biologique du sol. Ce qui conduit à la décompaction du sol par leurs racines et l'augmentation de sa teneur en matière organique, garante de la stabilité structurale, mais aussi en éléments minéraux mobilisables par les cultures. Les paysans, poussés par la nécessité avaient déjà eux-mêmes commencer à redonner vie à ce type de sols, qu'ils avaient dégradés, en combinant l'amélioration du travail du sol, des rotations, du matériel végétal et en réussissant l'intégration agriculture-élevage (IRA *et al.*, 1993).

Concernant l'usage des termes « dégradation » et « *hardé* », Raunet (2003) relève qu'il est dans les habitudes, depuis des décennies, de la part des agronomes et pédologues travaillant au Nord-Cameroun d'utiliser le terme dégradation, sous-entendu dégradation par l'homme dès que la surface du sol passe à une teinte claire, devient nue, battante, sans végétation, et est le lieu d'un ruissellement en nappe intense où l'eau rentre peu. Il est également fréquent qu'un tel paysage soit appelé *hardé* ou stérile, terme générique pour désigner ces plages nues. Le terme de dégradation nous paraît parfois être utilisé abusivement sans esprit critique, note Raunet (2003). Il est ainsi source de malentendus et de confusion. L'habitude consiste à appeler *hardé* un vertisol dit dégradé et de considérer que tous les vertisols ont vocation à se dégrader en *hardé* si on les surexploite. Ce terme de *hardé* est alors utilisé comme terme englobant divers types de sols battants et fermés. On a donc « *hardé* = dégradé = stérile ». Cette équivalence nous paraît dangereuse, observe Raunet (2003). En toute logique, et linguistiquement parlant, un état dégradé se réfère à un témoin initial non dégradé dont il dériverait. Ce serait une évolution défavorable qu'on peut appeler « *hardéisation* ». Dégradé signifie pire qu'avant ou moins favorable, concernant certains usages, ici, agricoles et ceci sous l'effet de certains agents. Un sol dégradé ou « *hardéisé* » doit pouvoir être réhabilité en principe, aussi sinon plus rapidement qu'il a été dégradé par l'homme. Il faut faire la distinction entre *hardé*, provoqué par l'homme donc effectivement dégradé et sans doute

réversible, en particulier avec les SCV et *hardé* à évolution pédogénétique naturelle, pour laquelle l'appellation dégradée est donc impropre et dont l'état est très difficile à améliorer pour les cultures. Le *hardé* naturel est le planosol halomorphe (à teneur élevée en sels notamment en sodium). Il ne s'agit pas d'un sol dégradé puisqu'il ne dérive pas d'un état plus favorable. En particulier, celui-ci ne dérive pas (comme on l'admet souvent) de la dégradation d'un vertisol, mais bien d'une pédogenèse propre et parallèle due à la présence de sodium en quantité importante sur le complexe absorbant des argiles. Il ne s'agit en aucun cas d'un sol dégradé. Un tel sol est difficilement réhabilitable, de multiples essais n'y sont pas arrivés (Raunet, 2003).

En effet, les *hardés* imposent à l'ensemble de la végétation, un stress hydrique important avec une faible infiltration de l'eau, renforcée par une disponibilité très médiocre de celle-ci. Ce qui contribue à éliminer la plupart des espèces végétales en zone aride (Donfack et *al.*, 1988). Le *hardé* provoqué par l'homme, qu'on pourrait, à la rigueur qualifier de vrai sol dégradé par perturbation du régime hydrique du fait des défrichement et mise en culture, est soit un vertisol soit un sol ferrugineux tropical lessivé hydromorphe, soit un sol hydromorphe dont la surface est devenue lisse et battante et dont la structure s'est effondrée par perte de sa matière organique. Un tel sol est parfaitement réhabilitable. La dégradation est ici due à la formation en surface, d'une pellicule limoneuse de battance de quelques millimètres d'épaisseur, scellant la porosité et empêchant ainsi la rentrée correcte de l'eau et la germination des graines. Il peut s'agir d'une très fine couche colluviale de transit par ruissellement et érosion en nappe (rôle par exemple de la fonte des termitières). La différence par rapport au planosol sodique est que le matériau atteint de battance affecte ici une couche de transit de quelques millimètres, alors que dans le second cas (planosol) le matériau de surface a une épaisseur de 10 à 30 cm et s'est formé par pédogenèse en milieu sodique. La « dégradation » est donc caractérisée en surface par une déstructuration due à une perte de matière organique, élément structurant majeur des sols, un départ des argiles, une augmentation corrélative en limon et sable qui se prend en masse (sans fissures), un colmatage de la surface par ces argiles et limons. Ce colmatage empêche eau et air de pénétrer et donc inhibe la germination des graines.

Sur les sols dégradés, l'intensité et la vitesse du ruissellement en nappe sont telles que dans les points bas, il y a une concentration des flux et percement de la croûte de surface. Une petite ravine se forme et progresse de l'aval vers l'amont (érosion régressive). Cette ravine se creuse en véritables ravins anastomosés aboutissant localement à des figures en « *badlands* ». Ceci se passe aussi sur les planosols (vrais *hardés*). L'horizon blanchi forme une tranche verticale (parfois en porte à faux) en dessous de laquelle le sol argileux dispersé, par le sodium, flue et forme un talus oblique caractéristique (Raunet, 2003). Les planosols halomorphes présentent une extension importante essentiellement sur les glacis et plaines de l'Extrême-Nord. Ils se développent sur des argiles alluviales et arènes déjà riches en sodium (d'origine, ils sont des feldspaths sodiques) au moment de leur dépôt. La dynamique alluviale du dépôt et l'origine lithologique de l'argile font que la répartition de ces sols dans la plaine peut paraître aléatoire. Dans la plaine de Salak cependant, les vertisols topo-lithomorphes occupent les larges cuvettes inondables alors que les parties amont périphériques ont plutôt évolué en planosols. Il y a donc quand même une certaine logique de répartition.

On reconnaît les planosols halomorphes assez aisément à deux caractéristiques simultanées : (i) un état de surface battant, glacé, fermé, très ruisselant où ne pousse presque rien, c'est ce qu'il est convenu par habitude de nommer une surface dégradée ; et (ii) un horizon supérieur de 10 à 20 centimètres d'épaisseur lavé, blanc, poreux, limoneux à limono-sableux (10 % d'argile), massif, reposant, très brutalement discontinu (discontinuité planique) sur une argile (20 à 40 % d'argile) brun-jaunâtre avec ou sans caractères vertiques. L'argile contient fréquemment des concrétions ferromanganiques noires et rondes. En profondeur, on peut observer des mycéliums et concrétions blanches calcaires. On observe parfois à la base des rognons blanchâtres de silice de 1 à 4 cm de large. La discontinuité à 10/20 cm peut passer à une fissure horizontale et à un véritable décollement. Cet horizon blanchi est particulièrement net dans les zones de ravinement où il forme une petite paroi verticale au-dessus du talus argileux qui, lui, est oblique et convexe. C'est ce qu'on pourrait appeler les sols *hardés sensus stricto* (Raunet, 2003). Le terme vernaculaire *hardé* ou sol stérile s'applique donc à toutes les zones battantes, non végétalisées, même si elles ne concernent pas les

planosols et dans ces cas-là elles sont d'origine anthropique. Ces zones sont appelées «*zippelé*» au Burkina Faso, «*Naga*» au Tchad. Par contre, les planosols halomorphes ne semblent pas être des sols dégradés par l'homme. La présence de l'horizon blanchi battant au-dessus de la discontinuité brutale est congénitale à leur pédogenèse. Une autre caractéristique constante des planosols halomorphes, chimique cette fois, est leur teneur élevée en sodium échangeable à partir de 40 cm de profondeur accompagnée de pH élevés, entre 8 et 10.

La présence du sodium dans ces sols est un héritage du matériau parental lorsque celui-ci est riche en feldspaths sodiques. La corrélation «*planosol-sodium*», même ailleurs qu'au Nord-Cameroun, est si forte qu'on est conduit à penser que le sodium joue un rôle primordial dans cette pédogenèse. La présence de sodium et d'un régime hydrique contrasté sur un matériau argileux dispersé où l'eau ne pénètre plus, induit sans doute une destruction superficielle (0-10/20 cm) des réseaux cristallins, des argiles (kaolinite, illite et montmorillonite) dont les sous-produits solubles ou colloïdaux sont évacués dans l'écoulement latéral hypodermique intense de sub-surface.

On trouve aux planosols halomorphes du Nord-Cameroun des propriétés très défavorables fortement interdépendantes : (i) la discontinuité planique brutale à 10-20 cm de profondeur, l'horizon lavé blanchi repose brutalement sur le plancher argileux. Cet obstacle est réhibitoire au passage des racines même en dehors des à-coups hydriques permanents, de l'absence de porosité et de structure du sous-sol «*dispersé*» et de ses propriétés chimiques très défavorables ; (ii) la dispersion des argiles : du fait des feldspaths sodiques en cours d'hydrolyse, par dispersion, s'opposant à la floculation des argiles, les ions sodium, remplaçant les ions calcium, s'opposent à la structuration et à la formation d'agrégats. Sous l'horizon limoneux blanchi supérieur, le sous-sol argileux est fermé et à faible porosité (30 à 34 %), à partir de 40 cm de profondeur. L'eau et l'air ne peuvent y circuler et à peine y pénétrer. Les racines n'y pénètrent donc pas également ; (iii) un régime hydrique très défavorable : l'eau, qui ne peut s'infiltrer en dessous de 20 cm, s'écoule latéralement dans l'horizon blanchi supérieur. Ceci en fonction des épisodes pluvieux. Dès qu'il ne pleut pas quelques jours, cet écoulement hypodermique tarit et le sol est sec très vite. Donc l'horizon blanchi est soit engorgé en

période de pluie, soit sec. Les racines, de toute façon bloquées par la discontinuité mécanique brutale du contact planique, y trouvent un milieu hostile et ne peuvent donc survivre. Les apports éventuels d'engrais solubles dans ces sols sont très rapidement évacués du sol par la nappe superficielle latérale ; (iv) des pH excessifs (8,5 à 10) en dessus de 40 cm. La forte proportion de sodium échangeable (le rapport Na/T pouvant dépasser 40 %) confère des pH alcalins très élevés pouvant atteindre 10. Ce pH étant compris entre 6 et 7 dans l'horizon supérieur blanchi. Il y a aussi une brutale discontinuité de pH donc des conditions d'assimilabilité des éléments minéraux. Dans ce type de sol, on constate souvent des toxicités en bore et de graves déséquilibres nutritionnels pour les plantes (Raunet, 2003).

Les planosols halomorphes peuvent s'observer en 3 situations dans le paysage : (i) sur les glacis de piémont, au pied des reliefs granitiques à gros grains dont des feldspaths sodiques. Ces sols sont associés à des sols peu évolués sur arènes ; (ii) sur les glacis de remblaiement colluvio-alluvial. Le sodium est ici alimenté par des couches d'arènes colluviales riches en feldspath sodique. Ces sols sont associés à des ferrugineux tropicaux hydromorphes et à des vertisols qui eux-mêmes peuvent être battants en surface, qualifié de sols dégradés et de *hardés* (au sens large) ; (iii) dans les plaines d'accumulations alluviales argileuses mais à lentilles sableuses albitiques. Ils sont alors associés à des vertisols topomorphes et aux sols peu évolués d'apport argileux. Les planosols halomorphes sont donc inféodés systématiquement à la présence de feldspaths sodiques à faible profondeur du matériau. Cela explique pourquoi on les observe souvent en « taches » au milieu d'autres sols. Le matériau colluvio-alluvial des glacis et plaines est assez imprévisible par nature ; il en est de même des sols.

2.2.4 Vertisols

Les vertisols ou sols vertiques sont ainsi nommés parce qu'ils sont l'objet de mouvements verticaux déterminés par le retrait et le gonflement des argiles qui les constituent. Ils sont, en effet, des sols très argileux, constitués d'argiles gonflantes (smectites) du type montmorillonite à l'Extrême-Nord du Cameroun (Figure 7). Ces mouvements vertiques incorporent la matière organique très profondément dans tout le profil du sol sans nécessairement l'intervention d'une activité biologique.

CARTE DES VERTISOLS EXTREME-NORD CAMEROUN
 (d'après P.Brabant et M.Gavaud, carte des sols, provinces du Nord et de l'Extrême Nord, 1984)

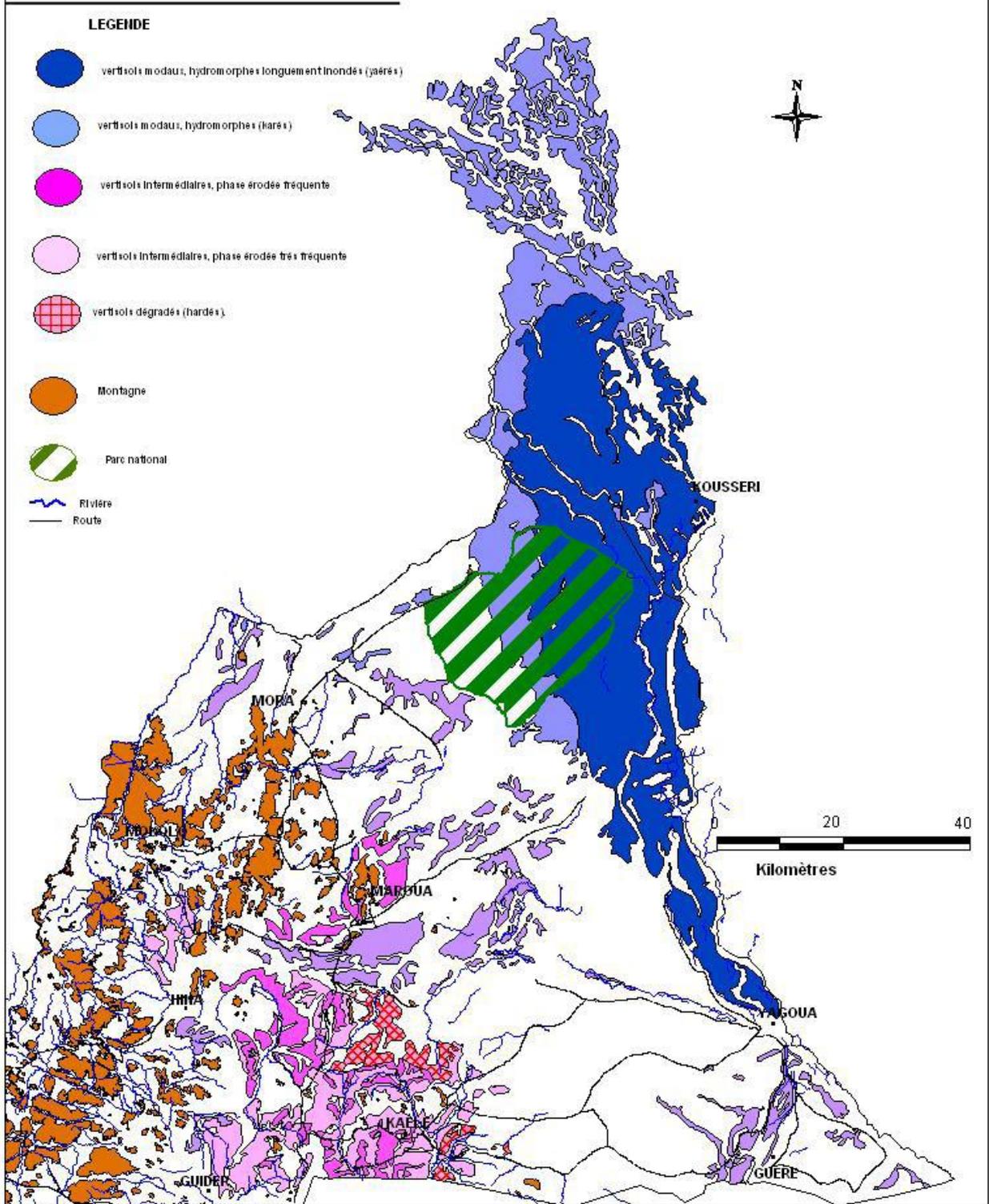


Figure 7 : Vertisols de l'Extrême-Nord, Cameroun

Tous les types de sols peuvent avoir une extension verticale : sols bruns vertiques, chernozems vertiques, sols alluviaux vertiques, sols à pseudogley vertiques, etc. Généralement, en saison sèche, les sols vertiques sont très marqués en surface par d'importantes fentes de retrait ou de dessiccation plus ou moins larges, plus ou moins profondes. Généralement, après une bonne pluie, le sol reste recouvert d'une couche d'eau de pluie que le sol a du mal à absorber et qui s'évaporera surtout. En effet, en présence d'eau, les inter-feuillets de ces argiles, saturés, se remplissent et s'écartent, faisant dilater l'ensemble avec des mouvements de ces argiles provoquant des faces de friction luisantes et striées. A l'inverse, la dessiccation vide les inter-feuillets, provoquant une forte rétractation aboutissant à une fissuration poussée (2 à 8 cm de large en surface) jusqu'à 1 mètre de profondeur.

Les vertisols sont en effet des sols noirs, très argileux, très boueux en saison pluvieuse. Ils sont de texture très fine, entraînant l'engorgement et ont un taux de matière organique et de phosphore généralement faible. Au Nord-Cameroun, ils sont généralement exploités en sorgho de décrue, de contre saison ou de saison sèche appelé localement *Muskwaari* (*Sorghum bicolor*), l'engorgement en saison pluvieuse ne favorisant pas le développement de certaines cultures comme le maïs, mais propice au riz. Raunet (2003) situe en particulier les vertisols topomorphes au Sud de Maroua, entre le Mayo Tsanaga et le Mayo Boula, notamment la zone de Salak. Ils constituent ce que les paysans appellent les « *karals ou karé* », inondables ou très engorgés et incultivables (sauf riz) en hivernage, à ressuyage lent en saison sèche, propices au sorgho de contre saison appelé communément *Muskwaari*. Les vertisols des plaines sont nettement topomorphes et lithomorphes c'est à dire qu'ils occupent de larges cuvettes sans ou à très faible drainage externe et sont formés sur des argiles déjà riches en montmorillonite au moment de leur dépôt. Ils sont constitués d'une argile noire supérieure (sur 0 – 100 cm) à grosse fissuration et très dure en saison sèche suivie d'une argile plus olivâtre en profondeur présentant de nombreuses faces de glissement caractéristiques et des concrétions calcaires blanchâtres de 1 à 4 cm de diamètre. Le taux d'argile y est en général élevé (40 à 65 %). La surface du *karal*, en l'absence de sorgho, peut présenter un microrelief dit « *gilgai* », avec des bosses et creux de 10 à 20 cm de dénivelée. Ces

sols ont des pH de l'ordre de 6,3 en surface, 7 à 8 en profondeur. La CEC est élevée : 20 à 35 méq, avec 80 à 100 % de saturation.

Les vertisols occupent, dans le paysage, des positions plutôt basses à drainage externe lent. Ils se forment sur des matériaux déjà riches en argiles gonflantes (certaines alluvions) ou sur des matériaux « basiques » riches en calcium et en minéraux ferromagnésiens (amphiboles, pyroxènes, ...), de type amphibolites, autres roches, arènes « mélanocrates » (sombres) ou mésocrates ou mi-sombres (Raunet, 2003). Brabant et Gavaud (1984) classent en cinq types les vertisols de l'Extrême-Nord du Cameroun : (i) les vertisols modaux, hydromorphes longuement inondés (yaérés) ; (ii) les vertisols modaux hydromorphes (karés) ; (iii) les vertisols intermédiaires à phase érodé fréquente ; (iv) les vertisols intermédiaires à phase érodé très fréquente ; (v) et les vertisols dégradés (*hardés*). Les vertisols dits « lithomorphes » dépendant uniquement du matériau et pouvant avoir une pente sensible (1 – 2 %) présentent un drainage externe fonctionnel et sont donc plus favorables ... Le coton et les céréales, surtout le sorgho, poussent bien sur ces sols, du fait de leur bonne fertilité chimique intrinsèque et de leur bon tampon hydrique qui amortit les fluctuations (Raunet, 2003). Par contre, l'arachide ne supporte pas ces caractéristiques. Les vertisols « topomorphes » sur argile montmorillonitique colluvio-alluviale, en position basse, évacuent l'eau de surface plus lentement. Ce sont surtout ces sols qui constituent les *karé*, dans les cuvettes à drainage lent des plaines d'accumulation alluviales (à l'exemple du *karal* de Salak, au Sud de Maroua). Ces *karé* conservent leur eau assez longtemps en saison sèche, pour permettre la culture du *Muskwaari* alors qu'en hivernage, l'engorgement empêche les cultures pluviales sans mesure d'aménagements spécifiques.

2.2.5 Sols rouges tropicaux

Les sols rouges, aussi appelés sols fersiallitiques, sont des sols qui se développent surtout dans les régions méditerranéennes et résultent d'une association forte et stable entre des colloïdes argileux (montmorillonite) et des oxydes de fer. Les " *terra rosea* " méditerranéennes par exemple sont des sols rouges riches en oxydes d'aluminium qui se sont formés lorsque ces régions ont connu un climat tropical. Ces sols sont généralement riches et fertiles, avec des humus stables, voire peu mobilisables. Mais ce sont de sols

fragiles, particulièrement sensibles à l'érosion éolienne ou hydrique, surtout dans la situation de découverte végétale dans laquelle ces sols se retrouvent après un incendie ou de suite du surpâturage. L'érosion réduit ces sols à des sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles. Les sols ferrallitiques sont aussi des sols rouges très riches en oxydes de fer et en oxydes d'alumine. Ils se forment sous couvert forestier et en climat tropical ou équatorial. Ce sont des sols très riches, mais extrêmement fragiles. Après suppression du couvert forestier qui les protège de l'érosion et du lessivage, ces sols se transforment rapidement en cuirasses à la suite d'une latéritisation. Les oxydes de fer et d'alumine colloïdale précipitent pour former des nodosités (alios) qui, s'ils se soudent, forment des cuirasses définitivement stériles. Les sols rouges tropicaux sont en effet caractérisés par une très bonne structure, avec une très bonne circulation d'air et d'eau. Recommandés pour la plupart des cultures, ils sont connus comme ayant d'excellentes qualités physiques et une fertilisation appropriée en azote et phosphore permet d'accroître leur fertilité (ORSTOM, 1980). Toutefois, ces différents types de sols sont exposés à la dégradation de leurs propriétés.

2.3 Impacts de la dégradation des terres

Les impacts de dégradation des terres sont entre autres : (i) la perte quantitative de sols (phénomène dit de régression); (ii) la perte de sols de qualité (phénomène de dégradation); (iii) la diminution de la productivité : l'accroissement récent de la population mondiale explique une forte pression sur les sols mondiaux. Plus de 5,5 milliards d'humains utilisent environ 10 % de la surface terrestre pour les productions animales et végétales. La plupart des sols présentent des signes de dégradation biologique, physique et chimique, limitant leur productivité. Une dégradation est dite légère quand le rendement potentiel est diminué d'environ 10 %, et modérée entre 15 et 50 %, forte au-delà de 50%. Les pays en voie de développement sont les plus touchés par ce phénomène, notamment en Asie et en Afrique (INRA, 2008).

Le processus de dégradation des ressources naturelles dont des sols en zone soudano-sahélienne du Cameroun s'organise autour de plusieurs facteurs mutuellement liés : (i) la forte pression foncière due à la croissance démographique qui est de 2,8% par an (BUCREP, 2010), et se traduit par la surexploitation de la terre agropastorale, avec

parfois des conflits générés par des usages concurrentiels de ces ressources. Ainsi, les meilleures terres pour l'agriculture pluviale estimées à 1,8 million d'hectares en 1991 au Nord-Cameroun (Brabant, 1991) auront connu une réduction non négligeable en matière de potentiel de production ; (ii) des conditions agroclimatiques limitantes : faiblesse et irrégularité de pluviométrie générant l'érosion hydrique, avec parfois la création des ravins ; (iii) une dégradation rapide des sols liée à leur nature, mais aussi à la faiblesse de leur teneur en matière organique (de l'ordre de 2%). Comme illustration de la dégradation des sols et de la baisse des rendements, l'étude menée dans la zone cotonnière du Cameroun par Adoum et Hinimbio (2007) montre qu'en dépit de la population fortement agricole (80%) et majoritairement active (54%), 25% des exploitations agricoles n'arrivent pas à couvrir leurs besoins en céréales, qui constituent pourtant l'alimentation de base de cette population. Dans cette étude, le déficit moyen est de 200 kg par ménage (soit 25 kg/personne/an) selon la norme de la FAO où les besoins en céréales dans cette zone sont de 200 kg/personne/an. Ainsi, avec une population de 6546265 habitants, soit 33,73% (BUCREP, 2010), on déplorerait dans les 3 régions septentrionales du Cameroun un déficit global de 163656625 kg/an de céréales à cause essentiellement de l'improductivité des parcelles. D'où la récurrence de la famine observée dans certaines localités de ladite zone.

La baisse de la productivité liée à la dégradation des sols entraîne aussi la pauvreté en plus de la malnutrition et de l'insécurité alimentaire. Ce dont contre quoi lutte l'ONU à travers les objectifs de développement durable (ODD), adoptés le 25 septembre 2015 à New-York. La vision ultime de cette initiative étant d'éliminer l'extrême pauvreté et la faim, assurer la sécurité alimentaire, améliorer la nutrition et promouvoir l'agriculture durable. La pauvreté au Cameroun touchait 37,5% des ménages en 2014 ; 39,9% en 2007 ; 40,2% en 2001 et 53% en 1996 ; estimation faite sur la base d'un seuil de pauvreté monétaire de 339715 FCFA par an, soit 931 FCFA par jour par équivalent adulte (ECAM4, 2014). À l'Extrême-Nord par contre, entre 2001 et 2007, le niveau de pauvreté qui est passé de 56,3% à 65,9% (MINEPAT, 2012) est essentiellement lié à la baisse de la productivité agricole étant entendu que plus de 80% de la population y pratique l'agriculture. Globalement, le taux de pauvreté s'améliore mais si peu pour atteindre l'objectif du taux de 28,7% en 2020 indiqué dans le DSCE, avec un taux de croissance

économique du PIB qui peine autour de 4,7% en 2014 alors que l'objectif est de 5,5% en 2020. Et ECAM4 (2014) relève d'ailleurs que cette baisse de pauvreté est mitigée, car si l'incidence de la pauvreté recule en milieu urbain, elle augmente plutôt en milieu rural, essentiellement agricole et le nombre de pauvres a augmenté au Cameroun, passant d'environ 7,1 millions en 2007 à 8,1 millions en 2014 du fait du taux de croissance de la population qui se situe autour 2,6%/an.

La situation en matière d'érosion est telle que certains experts évoquent la possibilité que l'agriculture, avec le temps, ne puisse plus aisément nourrir la population mondiale. Il y a une moindre fonction de puits de carbone, sachant que le stock de carbone dépend fortement du type de sol et de son usage (pratiques agricoles notamment). Le stock se fait essentiellement en surface et surtout (sauf dans les sols labourés) dans les 20 premiers centimètres. Le sol perd son carbone en culture intensive et le conserve ou en accumule sous forêts et prairies. La conversion de prairies, tourbières ou forêts en culture diminue fortement le stockage pédologique du carbone dans les sols, et inversement. Comme catastrophes naturelles sur les sols, on a : les coulées de boues, les inondations responsables de la mort de nombreux êtres vivants chaque année. L'érosion des sols déshydratés de l'Asie centrale est à l'origine d'une pollution chronique (poussières et aérosols) de l'air en Chine de l'Ouest, souvent visible par le satellite. On observe par ailleurs une dégradation qualitative et quantitative de la ressource en eau : l'augmentation des cycles inondations/sécheresse et de la turbidité des eaux et l'apport d'azote et de phosphore peut être à l'origine de phénomène d'eutrophisation et de développement de microbes pathogènes, ou d'apparition de zones mortes en mer et dans certains lacs (INRA, 2008). L'entraînement des particules de sols dans les eaux superficielles s'accompagne parfois de celui des produits agropharmaceutiques et de polluants d'origine industrielle, urbaine et routière (métaux lourds notamment). L'impact écologique des produits phytosanitaires est reconnu mais difficile à évaluer du fait de la multiplicité et des interactions des produits et de leur large spectre d'action. La compaction des sols peut faciliter le ruissellement des eaux avec les engrais épandus. Le cadmium parfois associé aux engrais et certains pesticides contaminent les sols, au point parfois de tuer durant un ou deux ans les graines qu'on y plante (AEE, 1995).

La dégradation des sols peut contribuer aux modifications climatiques, soit localement par modification de l'albédo, des microclimats (thermohygrométrie perturbée par les phénomènes de battance), voire l'émission du méthane et du protoxyde d'azote (N_2O) ; deux puissants gaz à effet de serre. En termes de perte de la diversité biologique, la dégradation des sols entraîne la disparition de la végétation climax et la disparition de nombreux habitats pour la faune. On peut parler ici de disparition d'écosystèmes, et de tout ce que cela implique d'un point de vue environnemental : diminution de la biodiversité végétale, extinction d'espèces animales, diminution de la résilience écologique (Newman, 1994). L'ONU et la FAO alertent depuis plusieurs décennies sur la dégradation de nombreux sols tropicaux, avec notamment de graves phénomènes de désertification et de salinisation. D'après une étude du professeur américain d'écologie David Pimentel, dix millions d'hectares de terres cultivables sont emportés par l'érosion chaque année (ONU, 2011) et la dégradation des sols concerne 33 millions d'hectares en Europe d'après l'ISRIC. Les principales causes de cette dégradation des sols sont entre autres des pratiques agricoles et sylvicoles inadéquates (labours, engins trop lourds), mais aussi les impacts de l'expansion urbaine, de la périurbanisation, de la croissance industrielle, du tourisme et des grands travaux qui empêchent les sols de rendre les services écologiques et agricoles qu'ils rendaient. Cette dégradation a une incidence directe sur les ressources en eau, air, biodiversité, ainsi que sur le changement climatique, avec des impacts possibles sur la santé de l'homme et des animaux et sur la sécurité sanitaire des denrées agricoles. Et en matière de biodiversité, plusieurs milliards d'organismes vivant dans les sols, dont seuls 5 % sont nommés, subissent des extinctions à cause de la dégradation des sols. Le rythme de dégradation des sols est nettement supérieur à la pédogenèse : un sol moyen nécessite environ un an pour qu'y apparaisse environ 100 kg de terre par hectare en moyenne, il atteint un centimètre d'épaisseur au bout de 50 à 2 000 ans selon sa localisation et sa topographie. Aussi, une alerte de diminution de 6 Mt/an sur une dizaine d'années de la capacité des sols agricoles à stocker le carbone, a-t-elle été faite. De ce qui précède, il est indispensable d'assurer une gestion raisonnée et durable des sols à travers des actions agroécologiques, avec éventuellement une fertilisation minérale d'appoint.

2.4 Réhabilitation du sol par l'agriculture de conservation

2.4.1 Résilience de l'agroécologie

La réponse et l'adaptation des populations rurales à la rupture d'équilibre et à la dégradation des sols doivent se construire sur une stratégie de lutte adaptée, intégrant une meilleure gestion des risques, et, si possible, les voies et moyens d'une régénération et d'une résilience améliorée des agroécosystèmes. Le concept de résilience est une notion centrale à considérer quand on parle de dégradation. C'est en fait l'aptitude d'un système à survivre à des perturbations dans sa structure et/ou son fonctionnement, et à retrouver, à la disparition de ces dernières, un état comparable à la situation initiale (Ramade, 1993 *in* Raunet et Naudin, 2006). Il s'agit en effet de l'aptitude à amortir les perturbations. On peut dire que la dégradation équivaut à une perte de résilience vis-à-vis des agressions combinées éco-climatiques et humaines. Un retour en arrière ou régénération par des moyens humains (avec des bonnes pratiques culturales par exemple) signifie, à l'inverse, un gain ou une récupération de résilience ; la résilience d'un agroécosystème constituant la base de sa durabilité (Raunet et Naudin, 2006).

L'agriculture de conservation est définie par la FAO (2018) comme une forme d'agriculture qui met en place des systèmes agricoles durables et rentables s'appuyant sur les principes d'un travail minimum du sol, des associations et rotations culturales et d'une couverture permanente du sol. Sur la base d'un semis direct, d'une couverture organique permanente du sol et d'une diversification végétale (Naudin, 2012), cette forme d'agriculture prend en compte la protection l'environnement (dégradation des sols) et la nécessité d'une augmentation de la production agricole mondiale pour faire face à la démographie à venir. Cette agriculture, troisième voie agricole entre agriculture conventionnelle et agriculture biologique, place le sol au cœur du système de production et met un point d'honneur sur sa gestion durable. En effet, c'est à partir de 1950 que les travaux précurseurs de la phase organiciste de la gestion des sols dite encore agroécologique, à l'opposé de la phase minéraliste, ont été initiés. La gestion du statut organique du sol devient une priorité. Sur le plan agronomique, ces travaux ont été structurés en différents ensembles (Oumarou, 2012). Il y a d'abord eu : a) les réflexions méthodologiques et conceptuelles ayant permis une meilleure compréhension du

processus d'élaboration des matières organiques du sol, leurs rôles et leur classification, b) l'identification des processus de dégradation des sols et des alternatives techniques assurant une meilleure intégration de la dimension organique dans la gestion des sols (agriculture organique, engrais verts, fumure organique, agroforesterie, les techniques culturales simplifiées, le non-labour, les systèmes de cultures sous couvert végétal, etc.) et une meilleure compréhension des mécanismes les encadrant, c) plus récemment les réflexions sur l'importance de l'agriculture (et des sols) dans la séquestration des gaz à effet de serre et le changement climatique.

En effet, cette pratique agraire raisonnée est fondée sur les principes d'une nouvelle agriculture, de nature agroécologique, régénératrice du capital sol et mettant en œuvre des interactions synergiques « sol-eau-biomasse-biodiversité ». Le mérite de cette thématique est de préserver pour les générations futures la fertilité des sols. De fait, les systèmes agricoles durables sont des pratiques nécessaires à la préservation des ressources naturelles, bases de l'activité rurale et agricole, laquelle est le pilier de l'économie des pays en voie de développement comme le Cameroun. Ainsi, l'agriculture de conservation en l'occurrence le SCV à base de la crotalaire ou même du *Brachiaria* est bien indiquée pour inverser la tendance de dégradation des sols. Aujourd'hui, plus de 90 millions d'hectares dans le monde et plus de 10000 ha au Nord-Cameroun sont cultivés sans labour et en semis direct sur un couvert végétal. Ces nouvelles pratiques, plus qu'une collection de techniques, demandent toutefois un véritable changement d'esprit, puisqu'on abandonne ce qui a toujours été considéré comme l'une des bases de l'agriculture : le labour.

La conservation est de fait le meilleur bien pour le plus grand nombre sur le plus long temps (Pinchot, 1977). Dans ce processus, les activités biologiques, animales et végétales, accumulent de la matière organique au sol qui s'assombrit. Suite aux migrations et accumulations, les horizons appauvris en argile et en fer s'éclaircissent, ceux enrichis en ces éléments jaunissent, brunissent ou rougissent. Ceux où le calcaire ou les sels s'accumulent, blanchissent. En matière de régimes hydriques, les horizons très bien drainés, recevant beaucoup d'eau mais s'asséchant vite et souvent, sont facilement rouges. Les horizons drainant moyennement bien, sont bruns ou jaunes ; ceux

drainant mal, sont gris ou tachetés de gris, de rouille, de jaune ou de noir. L'observation et la mesure des couleurs permettent donc de commencer à découvrir la constitution et le fonctionnement du sol. A partir de là, des déductions sont possibles quant à la fertilité du sol (CIRAD-GRET, 2002) et dont les possibilités d'intervention pour la lutte anti-érosive. Cette lutte pour la conservation ou la réhabilitation des espaces agrosylvopastoraux s'organise donc essentiellement autour d'une gestion rationnelle et pertinente du sol en l'occurrence la mise en place des aménagements spécifiques, adaptés aux types de relief (ados, biefs sur les cours d'eau), la mise en place des bandes anti-érosives (talus enherbé ou boisé), le semis en courbes de niveau, le travail minimum du sol, etc. Pour une bonne gestion du sol agricole, il est conseillé d'éviter les systèmes de culture appauvrissant en matière organique, et ceux obligeant à travailler en conditions trop sèches (risque de pulvérisation) ou trop humides (risque de tassement), éviter de laisser le sol à nu et éviter le pâturage sur sols humides (risque de tassement). Il faut par contre favoriser les apports de matières organiques (fumiers, composts, résidus de récoltes, engrais verts) ; et aussi favoriser les alternances de cultures permettant les alternances de types d'enracinement, un travail du sol qui aère sans tasser et la saturation du complexe absorbant en Ca^{2+} , l'idéal est d'avoir 80% du complexe en Ca^{2+} ; le reste en Mg^{+} , K^{+} , Na^{+} , NH_4^{+} , H^{+} (CIRAD-GRET, 2002).

Les aménagements sur des terrains cultivables pour limiter les effets d'érosion et favoriser la production agricole, permettent aussi de délimiter les zones pastorales, les zones agricoles et éventuellement les zones mises en défens. Ces techniques ont montré leur pertinence dans la réhabilitation des terres incultes ou dégradées et l'amélioration de la productivité, avec un effet positif sur la rétention d'eau, les caractéristiques physiques et chimiques des sols et l'évolution de la végétation. Des bornes en ciment et des arbres de délimitation sont généralement mis en contribution pour délimiter les parcelles avant l'intervention des aménagements proprement dits. Les plantations de délimitation sont davantage conseillées à raison de 50 plants/ha, en raison du rôle important que joue l'arbre dans l'agroforesterie. La végétalisation des berges est par ailleurs indiquée, ainsi que la promotion de l'agroforesterie avec la recommandation au Nord-Cameroun pour les espèces forestières et fruitières d'une densité de 200 arbres/ha mais davantage pour la plantation en haie vive. En outre, les mesures de protection de

ces arbres contre notamment les feux de brousse et les animaux en divagation, doivent être observées pour augmenter leur taux de survie, qui est généralement peu satisfaisant. L'érosion et la dégradation des sols peuvent être combattues par (i) des mesures et outils juridiques à l'exemple de «*Directive Sols*» en Europe ; (ii) des mesures de conservation des sols en préservant notamment le couvert végétal à travers la jachère ; (iii) des techniques efficaces corrigeant les situations de dégradation des sols de l'impact de la pluie, du vent ou de la circulation de l'eau : semis direct sous couvert végétal, non travail du sol, bois raméal fragmenté et surtout couvertures végétales anti-érosives. Ces couvertures aussi appelées tapis antiérosifs empêchent la déstructuration de la couche superficielle des sols et leur désagrégation. En facilitant l'installation rapide d'un couvert végétal dense, il y a absence de création des ravines et les sols deviennent stables.

Bien que généralement simples, les mesures anti-érosives nécessitent un minimum de technicité, de compétence en écologie des sols et de temps. Dans les faits, elles ne sont que rarement appliquées, car méconnues des agriculteurs, ou nécessitant d'importants changements de pratique (ex : abandon du labour) et plusieurs années pour porter leurs fruits. Le génie écologique a démontré sa capacité à permettre de spectaculaires reconstructions de sols. Certaines techniques agronomiques, beaucoup utilisées en agriculture biologique, améliorent en quelques années la structure du sol et les rendements. Des systèmes tels que les SCV sont porteurs d'espoir. L'apport régulier de matière organique, le mélange restaurateur des plantes de couverture, le non labour et la limitation de l'érosion et du ruissellement (par une couverture végétale permanente et un sol ayant retrouvé une bonne capacité d'infiltration et rétention de l'eau) en sont les principales clés. Ces techniques ne peuvent néanmoins pas intégralement restaurer les sols (incluant leur faune et flore propres) qui ont nécessité plusieurs centaines d'années et des espèces endémiques disparues pour atteindre leur état de stabilité. Aussi, une couche de terre de 20 à 30 centimètres imprégnée d'hydrogels permet de réduire l'érosion et même la quantité d'eau nécessaire à la culture en piégeant l'humidité et la relâchant très lentement, ce qui peut transformer un paysage désertique en terre fertile. En effet, l'agriculture de conservation offre 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. La technique du semis direct sur couverture végétale est

loin d'être nouvelle. Elle existe depuis le début de l'histoire de l'agriculture et reste la base de certains systèmes agricoles sous les tropiques (Dounias, 2001). Des modèles très anciens de semis direct sous couverture végétale existent encore dans la zone tropicale humide. Les idées de base et la mise en pratique du semis direct ont émergé en dehors des zones tropicales, d'abord aux USA à partir des années 1960, puis au sud du Brésil subtropical, en Australie, en Argentine et au Canada à partir des années 1970 (Raunet, 2003). Les pratiques agricoles, jusqu'alors constituées par le labour, les pulvérisations répétées des sols et la pratique excessive de la monoculture, ont entraîné des catastrophes écologiques de grande ampleur et aux lourdes conséquences socio-économiques. Le cas le plus connu est celui du *dust bowl* (nuages de poussière recouvrant infrastructures et champs) entre les années 1920 et 1940 dans les grandes plaines semi-arides américaines du fait d'une dégradation des sols et d'une érosion éolienne exacerbée. Ce véritable fléau national fut à l'origine de la remise en cause du labour dès les années 1930 aux USA. Des phénomènes comparables ont eu lieu en Australie durant les années 1950-1960. En Amérique latine, le semis direct a commencé à être adopté par quelques agriculteurs à partir des années 1970 suite à des phénomènes importants d'érosion hydrique dans le sud du Brésil (État du Paraná) et en Argentine dans les Pampas Centrales. Cette prise de conscience, individuelle ou collective, des processus d'érosion des terres, a été le point de départ du semis direct dans ces différentes régions du monde (CIRAD, 2008a).

Au Nord-Cameroun, dans une perspective de gestion durable des sols et de restauration de leur fertilité, les SCV y sont initiés en 2000 par le Projet DPGT à travers l'IRAD et mis en expérimentation par le Projet ESA dès 2002 sur les sites expérimentaux *ad doc*. Dans le bassin cotonnier du Nord-Cameroun, les superficies totales sur biomasse SCV étaient de 3300 ha pour la campagne agricole de 2008, contre 15607 ha de céréales associées à une plante de couverture en 2010 (Hinimbio, 2016). L'agriculture de conservation vise en effet l'intensification de la production agricole à travers la protection du sol de toutes les formes de dégradation. En Afrique, cette agriculture de conservation représente 1012840 ha soit seulement 1% des surfaces mondiales emblavées. L'activité biologique du sol (microfaune, racines, ...) remplace dans le cas des SCV l'effet de l'outil, ce que Séguy *et al.* (2001) appellent labour biologique. La

biomasse végétale peut ainsi être morte ou vive : cultures principales, résidus de cultures, inter-cultures, plantes fourragères, etc. Le sol n'est à aucun moment nu, le semis est donc direct et se fait aussi bien en association culture-plante de couverture que sur le *mulch*. On reconnaît aux SCV : (i) une fonction de recyclage des éléments minéraux qui, sans l'action des systèmes racinaires des plantes de couverture, seraient perdus par un lessivage profond, d'où un rôle efficace contre les pollutions azotées ; (ii) et une fonction de séquestration du carbone dans la mesure où une partie (aérienne et souterraine) des végétaux se transforme en humus stable et reste dans le sol.

Les SCV s'avèrent être des systèmes agricoles assurant durabilité et protection de l'environnement, pour les agricultures des milieux intertropicaux (Raunet et Ségué, 2006). Ils assurent une bonne performance agronomique illustrée par des bons rendements par rapport aux systèmes conventionnels. Ils s'inspirent directement du fonctionnement de l'écosystème forestier, naturellement stable, durable et basé sur une forte activité biologique (Ségué *et al.*, 2001). Au travail mécanique se substitue un travail biologique assurant la structuration du sol, le recyclage des éléments minéraux et une meilleure gestion de l'eau. Ces systèmes se rapprochent du fonctionnement d'une forêt car ils permettent la production d'une litière et fonctionnent en circuit fermé, sans perte de matière (éléments chimiques et terre) en profondeur ou en surface avec un recyclage permanent entre matières végétales mortes et vivantes.

2.4.2 Amélioration du statut organique et minéral du sol

La matière organique désigne les différents types de composés carbonés et azotés, qui sont distingués selon leur facilité à se minéraliser ou à former des complexes humiques stables avec la fraction argileuse, selon leur caractère plus ou moins acide, etc. Elle se décompose plus ou moins vite au sein du sol sous l'effet conjugué des mécanismes chimiques et biologiques. Eno Belinga (1983) relève que la température et l'humidité règlent les conditions de la minéralisation de la matière organique au cours de l'altération et de la pédogénèse. Avant de disparaître, la matière organique s'accumule, principalement dans les couches superficielles, et peut cependant migrer profondément dans les sols. Comme fonctions principales, elle participe à l'altération des roches et des minéraux, facilite ou retarde, selon les cas, la migration des constituants, facilite

l'agrégation des constituants et la porosité des assemblages, et est source d'aliments pour les plantes (retient et redonne aux plantes l'eau et les éléments fertilisants). La matière organique, par elle-même, par son complexe absorbant, par l'activité biologique qu'elle favorise, est de loin le meilleur artisan d'une bonne stabilité structurale (CIRAD-GRET, 2002).

La matière organique du sol est l'indicateur principal de la qualité du sol, à la fois pour des fonctions agricoles (de production ou d'économie) et pour des fonctions environnementales dont la séquestration du carbone et de qualité de l'air (FAO, 2002). Elle colore le sol en sombre (noir, marron, gris foncé...), tandis que le calcaire et les sels solubles (chlorures et carbonates) le colorent en blanc. En ce qui concerne le fer : (i) le fer ferreux dont la présence est due à un excès d'eau, colore le sol en gris et en bleu ; (ii) la goethite (oxyhydroxyde de fer, $\text{FeO}(\text{OH})$), conséquence d'un régime hydrique peu contrasté, le colore en brun et en jaune ; (iii) l'hématite (oxyde de fer, Fe_2O_3), conséquence d'un régime hydrique très contrasté, avec alternance fréquente d'une humidité forte mais aérée et d'une sécheresse accentuée, le colore en rouge (CIRAD-GRET, 2002). La matière organique dans un sol agricole idéal représente en volume 5% de la terre fine. Sa répartition est généralement la suivante : 80% d'humus, 15% de restes de plantes et d'animaux et 5% d'organismes vivants telluriques. Pour calculer la teneur en matière organique du sol à partir de la teneur en carbone, on applique la formule suivante : Matière organique (%) = 1,724 x Carbone organique (%).

La matière organique des sols est la seule réserve en azote et en soufre, et constitue aussi une petite réserve pour les autres éléments. Elle fournit au moins 50% du phosphore assimilable. Sa capacité d'échange cationique (CEC) est très importante : 100 à 300 méq/100 g de matière organique, et varie en fonction du pH. En sols acides, la matière organique atténue la toxicité aluminique par complexation de l'aluminium libre. Elle diminue aussi l'immobilisation du phosphore dans les sols à fort pouvoir fixateur car elle entre en concurrence avec les ions phosphates pour les sites électropositifs. En sols basiques, la matière organique tend à augmenter les charges négatives et donc à rapprocher le pH de la neutralité. L'état physique du sol est amélioré par toutes les formes de matière organique. Elle alimente la faune du sol qui, en creusant les galeries,

entretient la macro et la mésoporosité des sols (CIRAD-GRET, 2002). Pour décrire l'équilibre dynamique de la matière organique et son renouvellement dans le sol, l'utilisation de modèles mathématiques semble tout indiquée. Le modèle de Hénin-Dupuis a été proposé dès 1945 et il est encore souvent utilisé. Il a l'avantage d'être très simple par rapport aux autres où est distinguée la différence de minéralisation entre la biomasse microbienne et la matière organique inerte. Le modèle de Hénin-Dupuis considère seulement deux fractions de matière organique : (i) l'humus stable (H) qui se minéralise lentement et (ii) la matière organique fraîche (A) qui se décompose en laissant un peu d'humus stable. Chaque année, la minéralisation est :

Hm = k2 x H, k2 étant le coefficient de minéralisation et l'humification :

Hf = k1 x A, k1 étant le coefficient d'humification.

A l'équilibre, dans les sols non affectés par l'érosion, il se forme autant d'humus qu'il s'en détruit : $k_1 \times A = k_2 \times H$; d'où $A = H \times k_2/k_1$.

En connaissant ces coefficients et la quantité A de matière organique apportée chaque année, on peut prévoir l'évolution du stock de matière organique du sol. Une forte minéralisation est favorable pour l'alimentation des cultures, mais elle tend à diminuer les teneurs en matière organique du sol. Sous culture, les apports des résidus végétaux frais sont moindres que sous forêt naturelle. En outre, le sol est directement exposé au soleil et aux intempéries une partie de l'année. Ce phénomène augmente sa température et par conséquent la vitesse de minéralisation de la matière organique, mais aussi l'incidence de l'érosion sélective qui affecte les éléments fins riches en humus. Aussi, les teneurs en matière organique du sol décroissent : c'est une évolution inévitable. Elle est rapide parce que les températures sont élevées et les pluies agressives. Sous les cultures annuelles, les teneurs en matière organique peuvent diminuer de 40 à 50% en moins de 20 ans. La diminution est moindre sous les cultures qui couvrent le sol en permanence et laissent beaucoup de résidus (canne à sucre, cultures arbustives), ainsi que les cultures associées qui couvrent le sol en permanence, les parcs arborés des paysans, les plantes de couverture, etc. En effet, les teneurs en matière organique sont toujours plus faibles dans les sols sableux, les argiles par contre, protègent la matière organique de la minéralisation. Ce phénomène est vérifié sous végétation naturelle et sous culture (CIRAD-GRET, 2002).

2.4.3 Bioressources de couverture du sol

Les plantes de couverture du sol qui ont été mises en expérimentation au Nord-Cameroun sont entre autres *Crotalaria retusa*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis*, *Brachiaria ruziziensis*, *Mucuna pruriens*, *Eleusine coracana*, *Dolichos lablab*, *Stylosanthes hamata*, *Vigna unguiculata*. Ces plantes compagnes rentrent dans les systèmes innovants de culture, préconisés pour augmenter les teneurs en matière organique du sol, tout autant que l'introduction d'une sole fourragère ou une jachère plus ou moins pâturée, les plantes qui couvrent le sol en permanence, le développement de systèmes agroforestiers (CIRAD-GRET, 2002). Les plantes de couverture ont le potentiel d'améliorer la production agricole tout en limitant la dégradation des milieux cultivés. Roose (1992) relève que sans apport de fumure organique ou minérale, on ne peut espérer des productions raisonnables sur des sols sableux sur granite. Ainsi, l'introduction des plantes de couverture dans les systèmes agraires en zone cotonnière du Cameroun vise surtout à limiter la baisse générale du potentiel productif des sols à travers le concept de l'agriculture de conservation, avec effet de lutte anti-érosive. Hormis l'apport des engrais minéraux, l'alimentation naturelle des plantes se fait par recyclage des éléments, qui se minéralisent à partir des résidus végétaux. Lors des abattis brûlés, une partie importante de la réserve minérale contenue dans les plantes est libérée par le feu, mais de façon fugace, car l'excès des minéraux peut être perdu par le drainage, par l'érosion et le ruissellement, et surtout par le passage des éléments assimilables sous forme non assimilable (CIRAD-GRET, 2002).

La biomasse végétale utilisée comme couverture, morte ou vive, peut avoir plusieurs origines. L'option privilégiée dans le Nord du Cameroun est la production de biomasse *in situ*, avec une séparation temporelle entre son élaboration et son usage pour le paillage des cultures subséquentes. L'adoption des SCV dans les zones à pluviométrie réduite, comme celle de cette analyse, présente cependant des contraintes, au nombre desquelles la difficulté de produire une biomasse suffisante et l'insuffisance de recommandations confirmées de fertilisation organique ou minérale pour la mise en place des plantes de couverture d'introduction récente. La fumure recommandée sur *Brachiaria ruziziensis* ou sur *Crotalaria juncea* dans la zone cotonnière du Cameroun est quasiment commune à l'ensemble des graminées et autres cultures, aussi est-il important d'explorer son

adéquation en examinant leur réponse à des doses de fumure croissantes. En association céréale-*Brachiaria*, si le labour peut intervenir à la première année du fait d'aplanir les billons de l'année précédente, le sol ne sera plus labouré à partir de la deuxième année. La céréale ici pouvant être le sorgho de saison de pluie (*Sorghum vulgare*) ou le maïs (*Zea mays*). L'entrée en SCV l'année subséquente est conditionnée en partie par la quantité de biomasse obtenue. Elle est estimée à 7,5 tonnes (t) de matière sèche (MS) ha⁻¹ en zone cotonnière du Cameroun. Les effets attendus de cette biomasse vont dériver de la matière organique issue des parties aériennes et des racines de la plante de couverture dont l'évolution relève le taux de carbone et de nutriments du profil cultural.

2.4.3.1 Crotalaire

Les légumineuses notamment les crotalaires ont, au-delà des autres plantes de couverture, un atout important qui est celui de la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. De par leur nombre et leur diversité, les légumineuses ont des utilisations très variées, d'où leur importance économique et agronomique. Globalement, elles sont utilisées à plusieurs fins économiques dont en alimentation humaine à travers les graines (huiles de soja et d'arachide), les fruits (fève) ou les gousses (haricot) ; en alimentation animale : fourrage, foin, pâture, ensilage (trèfle, luzerne ...) ; en ébénisterie (bois précieux de *Copaifera* ou *Azalia*), menuiserie ou chauffage ; pour la fabrication de gommes (astragale), baumes, tanins, matières colorantes (*Indigofera tinctorial*). Comme importance agronomique, grâce à la fixation de l'azote de l'air par les *Rhizobium*, les légumineuses peuvent redistribuer de l'azote organique au sol. Cette matière organique servira de réservoir d'azote à partir duquel se formeront du NH₄⁺ et du NO₃⁻ par l'intermédiaire de microorganismes du sol. La symbiose légumineuse-*Rhizobium* présente donc un grand intérêt en permettant l'économie d'engrais azotés. Ainsi, la rotation d'une culture de graminée et de légumineuse permet un épuisement du sol moindre qu'une culture de graminée seule (Giller et Wilson, 1991). Ainsi, les légumineuses sont une source de matière organique et d'azote au sol et assurent la lutte contre l'érosion. Grâce à leur pouvoir d'utilisation de l'immense réservoir d'azote que représente l'atmosphère, et par leur intérêt aussi bien agronomique qu'économique, elles tendent à prendre une place de plus en plus

importante dans les systèmes de culture. Ce qui implique la connaissance et le choix de *Rhizobium* spécifiques très efficaces pour améliorer les rendements sans apport massif d'engrais minéraux. Compte tenu du rôle important des légumineuses, qui contribuent à atténuer le changement climatique, à améliorer la fertilité des sols et la biodiversité au sein des systèmes de cultures, la FAO a proclamé l'année 2016 comme l'année internationale des légumineuses. Par cette action, elle souhaite communiquer au travers du slogan « des graines pour nourrir le monde » afin de sensibiliser l'opinion publique aux avantages nutritionnels des légumineuses et à leur contribution à la sécurité alimentaire (Solag, 2016).

Parmi les nombreuses espèces de crotalaire comme plante de couverture (*ocroleta*, *longirostrata*, *juncea*, *retusa*, *cunninghamii*, *burhia*, *spectabilis*, *incanae*, *bamendae*, *natalitia*, *agatiflora*, *flower*, *verrucosa*, *obovata*, *pallida*, ...), quatre ont été mises en expérimentation par le Projet ESA dans le site de multiplication et de préservation du matériel génétique de Pitoa, au Nord-Cameroun : *Crotalaria retusa*, *Crotalaria juncea*, *Crotalaria spectabilis* et *Crotalaria ocroleta*. Seules les deux premières ont été agronomiquement testées plus performantes d'où leur comparaison faite sur le Tableau 2. *Crotalaria spectabilis* est très sensible aux attaques des insectes pendant la floraison, tandis que *Crotalaria ocroleta* qui s'apparente à *Crotalaria juncea*, résiste moins aux poches de sécheresse par rapport aux autres espèces de crotalaire. Par ailleurs, l'espèce *Crotalaria juncea* présente un développement rapide et une taille qui est pratiquement le double de la *Crotalaria retusa* à la même date de semis (Figure 8).



Figure 8 : Plants de *Crotalaria juncea* (à gauche) et *Crotalaria retusa* (à droite)

Tableau 2 : Comparaison entre *C. retusa* et *C. juncea* (PCS –ESA 2, 2010)

Indices de comparaison	<i>Crotalaria retusa</i>	<i>Crotalaria juncea</i>
Levée de la plante	Levée de dormance avant semis	Pas de levée de dormance avant semis
Cycle de la plante	Annuel mais résiste après le départ des pluies	Annuel et sèche juste après les pluies
Domaine de prédilection	Peu exigeant en sol et réussi partout dans la zone soudano-sahélienne	Nécessite un sol à fertilité moyenne
Résistance à la sécheresse et aux ravageurs	Résiste mieux à la sécheresse et aux ravageurs	Très sensible aux ravageurs et à la sécheresse
Apport biomasse	Important	Très important
Gestion du sol	Bonne avec apport de l'humus et des minéraux	Bonne avec apport de l'humus et des minéraux
Développement végétatif	Normal	Très rapide
Production graine	Produit toujours des graines, la croissance allant en saison sèche	Pas de production de graines en conditions difficiles
Effet d'allélopathie	Effectif	Effectif
Usage biomasse en champ	Paille peu encombrante	Paille nécessitant parfois un giro-broyage
Parasites	Peu résistante aux nématodes	Résistante aux nématodes
Croissance	Rapide	Plus rapide
Taille	Moyenne (1,50m)	Grande (2,50 m)
Lignification	Moyenne	Bonne

Comme dans les rotations culturales, la quantification et la compréhension de l'impact des légumineuses est nécessaire aussi bien pour des raisons agronomiques que pour des considérations environnementales, écologiques et économiques (Mvondo Awono, 1997). En plus des Fabacées telles que la crotalaire, les légumineuses concernent aussi bien les familles des Papilionacées et des Césalpiniacées. L'espèce *Crotalaria juncea* est une bioressource dont la garniture chromosomique est de $2n = 16$ (Brink et Achigan-Dako, 2005). Une bioressource étant, selon la Convention sur la diversité biologique, une ressource génétique, une ressource d'origine biologique, un organisme vivant ou éléments de celui-ci, une population ou tout autre élément biotique des écosystèmes ayant une utilisation ou une valeur effective pour l'humanité. Plus précisément, on peut parler de l'espèce *Crotalaria juncea* comme une agroressource du

fait de son utilisation en agriculture. D'origine indienne, l'espèce *Crotalaria juncea* L. présente un cycle de végétation plus court et assure une production de biomasse plus importante et une libération d'azote plus considérable que *Crotalaria retusa*. Contrairement à *Crotalaria retusa*, introduite au Nord-Cameroun en 2002, *Crotalaria juncea* est d'introduction plus récente (en 2010), en provenance du Brésil sous la recommandation de Lucien Séguy, chercheur sénior du CIRAD. Et donc peu de travaux ont été effectués sur cette essence au Nord-Cameroun. Aussi, *Crotalaria juncea* présente-t-elle un développement végétatif abondant et une production de biomasse beaucoup plus importante que *Crotalaria retusa* ; elle est par ailleurs résistante aux nématodes (PCS –ESA 2, 2010). La biomasse étant étymologiquement définie comme la matière vivante végétale, animale, fongique, bactérienne (par opposition à la nécromasse qui est la matière morte) ; c'est une source et un vecteur de services écosystémiques majeurs qui joue un rôle important dans le cycle du carbone et les puits de carbone : source d'aliments et d'énergies et élément du puits de carbone planétaire. Raunet et Naudin (2006) définissent la biomasse comme la masse totale des cellules vivantes d'un endroit donné, rapporté à la surface ou au volume. La faune et la flore du sol, la végétation et le plancton sont quantitativement les biomasses les plus importantes. Dans le règne végétal, on peut plus précisément parler de phytomasse ou biomasse végétale, exprimant la masse des plantes dont la *Crotalaria juncea* dans le cas d'espèce.

L'espèce *Crotalaria juncea* ne demande pas en effet une levée de dormance pendant que *Crotalaria retusa* en exige, soit par trempage dans l'eau chaude à 100°C jusqu'à refroidissement (ébullition), soit par trempage dans l'acide sulfurique pendant 15 minutes. En outre, elle a une taille moyenne de l'ordre de 2,50 m, pratiquement le double de celle de l'espèce *Crotalaria retusa*, avec un effet bénéfique de brise vent, car à hauteur H des plantes, une largeur 1H est protégée du côté au vent et 2H du côté opposé. De même, l'espèce *Crotalaria juncea* a un cycle de 120 jours tandis que celui de l'espèce *Crotalaria retusa* peut aller jusqu'à 150 jours ; ce qui permet naturellement à *Crotalaria juncea* de renouveler plus rapidement le stock de matière organique. Les rendements de *Crotalaria juncea* en matière sèche varient énormément selon des facteurs tels que l'épandage d'engrais et l'intensité de désherbage et peuvent atteindre 14 tonnes/ha ; les rendements en graines variant de 1000 à 2500 kg/ha et en fibres de 560 à 900 kg/ha. Ses

fibres peuvent être transformées sur les mêmes machines que celles du coton et la finesse de sa fibre et sa propreté ou son degré de rouissage sont décisifs pour sa transformation en cordes ou en textiles (Brink et Achigan-Dako, 2005). *Crotalaria juncea* présente des intérêts agronomiques, économiques, médicaux et dans l'intégration aux systèmes de cultures. Elle est utilisée comme plante médicinale et culinaire par plusieurs communautés (Chopra *et al.*, 1956). Ainsi, elle sert de purificateur de sang, d'astringent, de purgatif, d'émétique, de ménorragie et de traitement contre l'anémie (Sharma *et al.*, 2001). Ses tiges servent à la combustion ou à la construction des clôtures des maisons.

La crotalaire est un indicateur utile pour relever la carence en potassium et en calcium d'un sol. Les tiges séchées et le foin sont utilisés comme fourrage en saison de soudure, mais la quantité de fibre dans les tiges est si élevée 6 semaines après le semis pour les considérer comme fourrage (Mansoer *et al.*, 1997). Mannetje (2012) relève que les feuilles et les tiges de cette crotalaire sont à sécher avant l'alimentation des bovins et ovins. (USDA-NRCS, 2009) indique que la variété « *Tropic sun* » n'est pas toxique aux animaux. Bien qu'on les signale toxiques pour le bétail, ses graines servent à nourrir les chevaux en Union soviétique et les porcs au Zimbabwe. Les tiges ligneuses restant après l'extraction des fibres sont utilisées comme combustible. Les graines sont utilisées dans la production d'un adhésif pour le contreplaqué et comme substitut du café. Le développement ou l'adoption de cette espèce à grande échelle est encore à ses débuts dans la plupart des exploitations.

La crotalaire une plante à développement très rapide lorsque les conditions sont favorables. Aussi, dans le cas des associations avec des céréales (sorgho ou maïs) les installations précoces sont positives sur la productivité de la culture principale. La productivité étant définie par Raunet et Naudin (2006) comme l'aptitude potentielle d'un organisme (végétal ou animal) à fournir une certaine quantité d'un produit déterminé (plante entière, fruits, graines, fourrage, fibre, huile, bois, lait, viande, laine, etc.) rapportée à une unité d'espace ou de temps. De plus, cette essence est caractérisée par un *shading-off* très prononcé de son feuillage qui peut être emporté par le vent ou détruit par diverses attaques naturelles (feu de brousse par exemple). Ce qui peut limiter la quantité de biomasse produite pour la couverture du sol. En général, le carbone,

l'oxygène et l'hydrogène sont les principaux constituants des végétaux et dont de l'espèce *Crotalaria juncea* dont l'ordre de grandeur des teneurs est défini par rapport à la matière sèche (Tableau 3).

Tableau 3 : Exemple de contenu minéral des végétaux (Bertrand et Gigou, 2000)

Elément	Symbole	Teneur	Type
Carbone	C	40 à 45 %	Constituants principaux
Oxygène	O	40 à 45 %	
Hydrogène	H	6 à 7 %	
Azote	N	1 à 3 %	Eléments majeurs
Potassium	K	1 à 4 %	
Phosphore	P	0.1 à 0.4 %	
Calcium	Ca	0.1 à 0.5 %	Eléments secondaires
Magnésium	Mg	0.1 à 0.4 %	
Soufre	S	0.1 à 0.4 %	
Fer	Fe	50 à 500 ppm	Oligo-éléments
Manganèse	Mn	20 à 500 ppm	
Zinc	Zn	20 à 200 ppm	
Bore	B	Monocotylédone : 5 à 20 ppm Dicotylédone : 20 à 60 ppm	
Cuivre	Cu	5 à 20 ppm	
Molybdène	Mo	0.1 à 1 ppm	
Chlore	Cl	20 à 500 ppm et jusqu'à 10 %	
Sodium	Na	Très variable	Eléments utiles pour certaines cultures et animaux
Sélénium	Se	0.1 à 1 ppm	
Cobalt	Co	0.02 à 0.5 ppm	
Aluminium	Al	200 à 300 ppm Théiers : 2000 à 5000 ppm	
Silice	SiO ₂	0 à 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, l'espèce *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, de couleur sombre. Le poids de 1000 graines varie de 30 à 55 g et ces graines contiennent 34,6% de protéines crues (Duke, 1983). La production est en général limitée par les mauvaises conditions pédoclimatiques, ce qui contribue à élever le prix de semences, qui est en moyenne de 500 FCFA/kg au Nord-Cameroun. Cette espèce botanique donne autour de 90 JAS un aspect ornemental avec des feuilles vertes et des fleurs jaunes.

2.4.3.2 *Brachiaria ruziziensis*

Aussi appelé *Congo grass*, *Brachiaria ruziziensis* est une espèce héliophile, originaire d'Afrique tropicale. Elle se développe sur des sols sableux et secs, sur les sols ferrugineux dégradés sur grès ou sur les sols ferrugineux de cordon dunaire. Elle se développe dès le début de saison de pluie en mai-juin et la floraison intervient très rapidement, un mois et demi après levée et se prolonge jusqu'en septembre. Elle est suivie rapidement par la fructification et la dissémination qui se prolongent jusqu'au dessèchement de la plante. Les premières feuilles de la plantule ont une préfoliation enroulée, le limbe est lancéolé à linéaire et légèrement élargi à la base, les deux faces sont finement pubescentes. Le port de l'adulte est en petite touffe de 10 à 50 cm d'abord étalée puis dressée, ce qui permet un enracinement au niveau des nœuds, à la base des tiges. Les rameaux se développent au niveau des nœuds de la base. Les racines sont fasciculées. Le chaume est cylindrique, finement strié et glabre. Les feuilles sont alternes, de teint vert clair, la gaine est finement pubescente sur la face externe, parfois glabre et non carénée. La marge de la gaine présente quelques cils transparents en touffe à proximité de la ligule. La ligule est formée de cils, disposés sur une seule rangée et hauts de 0,4 mm. Le limbe est lancéolé à linéaire, plus ou moins étalé à l'horizontale avec un sommet en pointe aiguë. La nervure centrale forme une petite carène arrondie de couleur blanche. L'inflorescence est une panicule formée de 5 à 9 racèmes, obliquement dressés et répartis le long de l'axe glabre à légèrement pubescent, long de 5 à 10 cm. Les racèmes linéaires et longs de 1 à 4 cm portent les épillets par paires. Les épillets de forme ellipsoïdale comportent deux fleurs de petite taille, une fleur inférieure mâle ou asexuée et une autre supérieure bisexuée. Lors de la dissémination, la graine reste enfermée dans la paléa et la lemma (Le Bourgeois et Merlier, 1995).

Cette espèce confirme son adaptation à diverses conditions agroécologiques dont celles du Nord-Cameroun. Ses racines fonctionnent comme des 'pompes biologiques' capables d'exploiter les réserves en eau du sol et de remonter et recycler les éléments minéraux situés dans les couches profondes du sol. Elle a aussi pour avantage net, la production de biomasse dans des conditions pédoclimatiques plus sévères comme en zone soudano-sahélienne (Figure 9).



Figure 9 : Sole de *Brachiaria ruziziensis* à 60 JAS

En effet, elle est capable d'extraire le peu d'éléments nutritifs qui restent dans les sols pauvres et sa production sur ces derniers, sans fertilisation (organique ou minérale) les épuise davantage notamment l'azote : ce qu'on appelle la faim d'azote. Elle est introduite en 2002 dans les SCV au Nord-Cameroun, à cause de son potentiel élevé de production de biomasse mais, sa forte appétence par le bétail réduit l'effet attendu de couverture du sol et de conservation de sa fertilité. Dans de bonnes conditions, la production de biomasse aérienne peut atteindre 25 t ha⁻¹ de matière sèche (Mvondo Awono et al., 2012). Ces auteurs ont toutefois trouvé que la production moyenne de biomasse de l'espèce *B. ruziziensis* est significativement différente entre les sites du Nord, du Centre et du Sud de la zone cotonnière du Cameroun : Guiring (11,7 t ha⁻¹) et Djalingo (8,6 t ha⁻¹), Touboro (20,2 t ha⁻¹). Ce qui est au-delà de la recommandation de 7,5 t ha⁻¹. Les effets attendus de cette biomasse vont dériver de la matière organique issue des parties aériennes et des racines de la bioressource dont l'évolution relève le taux de carbone et de nutriments du profil cultural. En effet, la production d'une biomasse aérienne de 20 t MS ha⁻¹ de *B. ruziziensis* est accompagnée d'environ 5 t MS ha⁻¹ de racines et avec une forte fertilisation azotée, l'espèce *B. ruziziensis* peut produire des quantités de matière sèche plus importantes (Husson et al., 2008 ; Seguy, 2001). On a pu obtenir 25,6 t ha⁻¹ de biomasse aérienne de *B. ruziziensis* avec l'application de 336 kg N ha⁻¹ (Schultze-Kraft et al., 2009). La fertilisation à la dose 200 kg N ha⁻¹ a permis d'obtenir la biomasse la plus élevée (13,24 t ha⁻¹) de *B. ruziziensis* à la montaison dans la région des hautes terres de l'Ouest Cameroun (Tendonkeng et al., 2010). Dans cette

étude, la quantité d'azote apportée par la dose de fertilisants la plus élevée (150% de la fumure minérale vulgarisée avec 6 t ha⁻¹ de poudrette de parcs de bovins) est 111,5 kg N ha⁻¹. Par ailleurs, la biomasse de *Brachiaria* est très exposée aux feux de brousse, où une partie importante de la réserve minérale contenue dans les plantes est libérée par les feux, et soumise au drainage, à l'érosion et au ruissellement, et surtout au passage des éléments assimilables sous forme non assimilable (CIRAD-GRET, 2002).

2.4.4 Autres sources de la matière organique du sol

Plusieurs matières peuvent être utilisées pour la reconstitution de la matière organique du sol en l'occurrence le fumier, le compost, l'engrais vert, le bois raméal fragmenté, la biomasse végétale et les gadoues de ville ou ordures ménagères. Dugué (2009) propose 3 types de fumure organique : (i) la fosse domestique : incorporer toutes les déjections des volailles et petits ruminants riches en nutriments, les cendres riches en P et K (mais bien les éteindre à l'eau sinon le mélange peut se consumer). En mobilisant ces produits riches en N, on peut y adjoindre des éléments riches en C (coques d'arachide, rafles de battage, paille de toit, etc....) ; (ii) la fosse fumièrè : généralement elle contient surtout des déjections animales. Il s'agit alors de remonter la teneur en C en incorporant des litières sous les animaux ou les biomasses domestiques (rafles, coques d'arachide) déjà citées ; (iii) et la fosse compostière au champ : intérêt majeur d'un apport de phosphate naturel tricalcique (PNT) qui assure un enrichissement conséquent du compost en P et aussi en Ca. Si le paysan peut accéder à des déjections animales situées non loin de la fosse compostière un ajout de ces déjections (10 % voire 20% du mélange) ne fera qu'améliorer la qualité du compost obtenu. On peut aussi envisager d'adjoindre au compost des adventices vertes en cours de saison des pluies.

2.4.4.1 Fumier

Le fumier est le produit de la fermentation d'un mélange de pailles plus ou moins piétinées et de déjections animales, qui permet un recyclage efficace des éléments minéraux plus concentrés et plus assimilables que dans les résidus de départ. Il peut être utilisé comme amendement organique, avec des effets positifs sur la structure du sol et le relèvement du pH acide (CIRAD-GRET, 2002). Les actions en faveur de la promotion de la fumure organique notamment le fumier semblent très populaires quelles que soient

les régions. Les raisons de cet engouement sont le renchérissement du prix des engrais et parfois la subvention à l'achat du matériel de manutention ou de transport du fumier par les projets.

En zone tropicale, il existe des fumiers de plusieurs qualités, du mélange de terre avec un peu de matière organique jusqu'aux bons fumiers. Le fumier le plus courant en Afrique, appelé poudrette de parc ou terre de parc, est récolté dans les enclos, où les animaux sont gardés, sans apport de pailles ; c'est donc un mélange de terre et de fèces non fermentés. Il contient moins de 50% de matière organique et sa composition est variable suivant la proportion de terre. Il contient souvent beaucoup de graines d'adventices viables qui, lorsque mal contrôlées, peuvent infester les champs. Un bovin de 250 kg (unité de bétail tropical – UBT) consomme chaque année environ 2,5 tonnes de matière sèche de fourrage dont un peu moins de la moitié est rejeté sous forme de bouses, parmi lesquelles 200 à 300 kg arrivent dans les parcs de nuit. Mélangées à la terre, la production est ainsi de 500 à 600 kg de poudrette par UBT et par an (CIRAD-GRET, 2002). Les déjections des caprins, des ovins, des porcins et de la volaille sont parfois mises à contribution pour la production du fumier. L'utilisation du fumier est indiquée après une bonne décomposition et une bonne minéralisation (Tableau 4).

Tableau 4 : Richesse minérale des fumiers (méq/100g) (Pieri, 1989)

Minéraux	Mali		Sénégal	
	Moyenne	Mini-Maximum	Moyenne	Mini-Maximum
N	1,18	0,00-2,05	1,41	0,49-2,69
P ₂ O ₅	0,74	0,31-1,45	0,69	0,29-1,55
K ₂ O	1,83	0,31-5,02	1,47	0,24-3,53
CaO	1,24	0,28-2,73	1,60	0,51-2,89
MgO	0,69	0,18-1,33	0,81	0,20-1,33
S	0,15	0,05-0,23	-	-

La production et l'utilisation du fumier a toutefois quelques contraintes. Adoum *et al.* (2008) relèvent des difficultés évoquées par les agroéleveurs : indisponibilité de l'eau d'arrosage du fumier, du matériel de production ou kit de manutention (pioche, pelle, fourche), coût élevé du matériel de transport (charrette, pousse-pousse, brouette) ; main d'œuvre de transport de l'eau et des pailles vers l'étable, de sa production et de son épandage. Les feux et la vaine pâture limitent également la biomasse disponible pour produire un fumier de bonne qualité, avec un apport raisonné de paille comme litière,

pourvoyeuse d'humus. Comme autres contraintes, on note l'insécurité foncière, la non-maîtrise des techniques de production du fumier, l'indisponibilité des animaux et de leurs fèces. L'appui de la SODECOTON et de la CNPC-C en zone cotonnière du Cameroun a facilité l'achat des charrettes bovines par les agroéleveurs ; avec effet de hausse de la quantité du fumier épandu en champ (5, 6 t/ha au lieu 5 t/ha) et des surfaces fumées à 20% en plus dès la deuxième année de subvention (Adoum *et al.*, 2008).

2.4.4.2 Compost

Le compost est une sorte de fumier artificiel, produit à partir des tiges et feuilles de végétaux, ou des déchets ménagers biodégradables, mélangés ou non à très peu de déjections animales. Il a un effet favorable sur la fertilité du sol, mais coûteux en transport, en manipulations, si bien qu'il n'est généralement utilisé que dans les pépinières et le maraîchage. Le compostage des ordures ménagères (résidus de repas, balayures, chaumes, ...) améliore l'hygiène des habitations et produit de l'engrais organique riche en cendres, qui sont un véritable amendement basique, très efficace pour relever le pH des sols acides.

2.4.4.3 Engrais vert

Les engrais verts sont des cultures destinées à être enfouies dans le but d'augmenter le niveau de fertilité d'un sol notamment la teneur en matière organique (CIRAD-GRET, 2002). Ces cultures sont généralement éphémères et constituent des couvre-sol temporaires pour éviter les mauvaises herbes, l'érosion et le lessivage des éléments nutritifs des plantes. Ce sont généralement des cultures dérobées (maïs, sorgho, pois d'angle, riz, haricot, niébé, etc.) qui permettent de stocker dans des tissus végétaux jeunes, des éléments minéraux qui sont exposés au lessivage sans cette fixation. Ces jeunes tissus enfouis, peuvent se décomposer facilement pour alimenter la culture suivante, mais aussi augmenter la stabilité structurale du sol. Les éléments nutritifs fournis sont 100% naturels et donc sans effet indésirable sur l'environnement comparés à certains engrais minéraux. Ces engrais peuvent aussi faciliter l'infiltration de l'eau, augmenter la teneur de rétention en eau du sol et limiter le ruissellement. Ils peuvent être divisés en trois principales catégories : (i) les cultures intercalaires, qui sont semées en même temps ou après la culture principale et entre les rangs de celle-ci, (ii) les engrais

verts en dérobée ou cultures de couverture, qui poussent avant ou après la culture principale et (iii) les engrais verts de pleine saison, qui vont remplacer la culture principale pendant toute une saison. Ils peuvent être détruits par l'hiver, par un travail mécanique (roulage, brûlage, labour ou autres) ou par un traitement herbicide. La culture du riz en saison sèche est un cas particulièrement intéressant, où le riz accumule l'azote sous forme organique et évite qu'il soit nitrifié puis dénitrifié à la mise en eau de la rizière (CIRAD-GRET, 2006).

2.4.5 Humification et minéralisation de la matière organique

Le devenir de la matière organique du sol est assuré par les processus d'humification et de minéralisation. L'humification est la transformation de la matière organique en humus, qui en constitue le stade ultime de décomposition. L'humus est considéré comme un polymère de polyphénols, d'acides aminés, d'aldéhydes et de lignine. C'est un composé organique stable, à noyaux aromatiques, riches en radicaux libres. Il comprend des acides fulviques et humiques extractibles à la soude (alcalino-solubles) et l'humine qui est totalement insoluble ; ces composés à fort poids moléculaire (100 000) sont polymérisés à partir de noyaux aromatiques (phénols) provenant de la destruction de la cellulose et de la lignine sous l'action microbienne, en particulier des champignons (CIRAD-GRET, 2002). Son type dépend des caractères de la végétation et du climat. L'humus est généralement associé aux minéraux argileux et forme le complexe argilo-humique lequel joue un rôle essentiel dans la structure du sol, ses propriétés mécaniques, physiques, hydriques et chimiques. Un sol peut être caractérisé par sa capacité d'échange cationique (CEC) proportionnelle à la quantité de charges électriques portées par le complexe : plus la CEC est élevée, plus le sol peut adsorber et désorber des cations qui sont mis à disposition des racines. La CEC dépend de la nature des argiles et de leur association avec les composés humiques. Les différents types d'humus que l'on peut observer dans la nature sont issus de processus biochimiques complexes, ceux-là dépendant des conditions pédologiques régnant localement.

En zone tropicale, les apports des résidus organiques au sol sont réduits et les teneurs en matière organique diminuent plus vite, car la vitesse de minéralisation, fonction de la température, est plus rapide. Ce qui peut être un avantage en termes de fourniture

d'éléments minéraux aux cultures, mais aussi un inconvénient en ce qui concerne l'appauvrissement du sol en matière organique. La matière organique du sol provient du recyclage naturel des végétaux, des apports de fumier, de poudrette ou de compost, des engrais verts, des résidus de cultures ou des systèmes de production agricole tels que le système de culture sous couverture végétale. L'humification est assurée par la macrofaune et la mésofaune du sol qui consomment les résidus végétaux et libèrent les excréta : c'est la biodégradation de la matière organique. Tandis que la minéralisation est assurée par les microorganismes édaphiques qui utilisent la matière organique libre (humus, excréta) pour leurs besoins énergétiques élevés du fait d'une activité métabolique intense. Ces pédo-organismes sont beaucoup plus nombreux dans les litières, les horizons de surface et la rhizosphère des plantes où les conditions énergétiques et nutritionnelles sont les meilleures (Bonneau et Souchier, 1994).

La matière organique des sols est la seule réserve en azote et en soufre, et constitue aussi une petite réserve pour les autres éléments. Elle fournit au moins 50% du phosphore assimilable aux plantes et beaucoup plus dans les sols à fort pouvoir fixateur. Elle constitue aussi une petite réserve pour les autres éléments nutritifs, dont les oligo-éléments. Les quantités minéralisées peuvent être supérieures aux besoins des cultures. Sa CEC est très importante : 100 à 300 méq/100 g de matière organique, et varie en fonction du pH. En sols acides, la matière organique atténue la toxicité aluminique par complexation de l'aluminium libre. Elle diminue aussi l'immobilisation du phosphore dans les sols à fort pouvoir fixateur car elle entre en concurrence avec les ions phosphates pour les sites électropositifs. En sols basiques, la matière organique tend à augmenter les charges négatives et donc à rapprocher le pH de la neutralité. L'état physique du sol est amélioré par toutes les formes de matière organique. Elle alimente la faune du sol qui, en creusant les galeries, entretient la macro et la mésoporosité des sols (CIRAD-GRET, 2002).

Quatre critères fondamentaux permettent de caractériser l'humus, à l'issue de l'extraction par la méthode de fractionnement chimique et l'électrophorèse (BIS, 1963) : (i) la nature des acides humiques : ce critère indique le degré d'évolution et de polymérisation des acides humiques et aussi le degré de liaison avec les colloïdes

minéraux, les plus polymérisés (G ou gris) étant liés très intimement aux argiles ; (ii) le pouvoir réducteur des acides humiques, est un excellent critère de la polymérisation ; (iii) le rapport acides fulviques / acides humiques, qui est faible dans les humus les plus évolués ou polymérisés tels que les vertisols. Il est élevé dans les humus à faible polymérisation tels que les sols ferrallitiques ou les sols bruns méditerranéens ; (iv) et le taux d'humification, qui donne le pourcentage des composés humiques extraits, par rapport à la matière organique globale : il est exprimé en carbone, la somme des carbones des acides fulviques et des acides humiques étant comparée au carbone total. Cette valeur donne une indication précieuse sur le degré d'évolution de la matière organique. Les humus riches en matière organique fraîche ont un taux d'humification faible : c'est le cas des humus des sols bruns méditerranéens. Le taux d'humification varie de façon étroite en fonction des facteurs du milieu, qui conditionnent une activité plus ou moins élevée de la microflore humifiante.

2.4.6 Formation du complexe argilo-humique

Les propriétés physiques et chimiques du sol sont dominées par le complexe argilo-humique (CAH), qui confère au sol son pouvoir absorbant. Le CAH est issu de la décomposition des substances organiques (humus) et de l'altération des roches, qui donnent les argiles à propriétés colloïdales positives et négatives. Les particules d'argile sont constituées de silicates d'alumine (kaolinite, smectite, vermiculite, chlorite, illite, montmorillonite...) et d'hydroxydes de fer et d'alumine (hématite, limonite...). Au Nord-Cameroun, la kaolinite est le minéral argileux dominant (60 à 70%), suivi d'interstratifiés gonflants et d'illite (30% à 60%) mais aussi des minéraux accessoires (produits amorphes, goethite, chlorite : 10%). On trouve aussi la montmorillonite à une proportion non négligeable dans certaines zones. La capacité d'échange cationique (CEC) de la fraction argileuse granulométrique est de 35 à 40 méq/100g (Brabant, 1991a). Le CAH est surtout chargé négativement et fixe ainsi les cations (Ca^{2+} , K^+ , Fe^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Al_3^+) qu'il retient plus ou moins énergiquement, ce qui est bien en phase avec la loi de physique selon laquelle deux corps de même nature se repoussent et deux corps de nature différente s'attirent.

Le complexe argilo-humique est un élément fondamental de la stabilité et de la fertilité des sols. Parmi les différents éléments minéraux présents dans le sol, les argiles, particules les plus fines, s'associent à la matière organique du sol (l'humus) pour former, sous l'action stabilisatrice du calcium, ce complexe argilo-humique. Celui-ci est un pilier de l'architecture du sol, lui permettant de résister aux agressions climatiques, améliorant la capacité de circulation et de stockage de l'eau ainsi que la rétention et la redistribution des éléments minéraux nécessaires aux cultures. La structure en feuillet des argiles confère au complexe une puissante charge négative qui attire les nombreux cations libres de la solution du sol (Ca^{2+} , K^+ , H^+ , Na^+ , etc.). Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs pour la culture qui échange en permanence des ions avec la solution du sol environnante. La mise en réserve ou la libération des éléments nutritifs peut être biologique, sous l'action des microorganismes du sol ou même chimique. La profondeur et l'importance de ce phénomène varient selon le climat et le pH du sol. En sols neutres et alcalins, le calcium Ca^{2+} joue le rôle majeur de ciment entre les feuillets d'argile et entre les particules d'argile et l'humus. En sols acides ou décalcifiés, le calcium est remplacé par l'hydrogène H^+ qui, au contraire, est un élément de dispersion, accentuant les phénomènes de compaction, d'asphyxie, etc. (Guinot, 2007).

2.5 Fixation symbiotique de l'azote

Le cycle de l'azote illustre bien l'important rôle joué par les micro-organismes dans la biogéochimie. Quoique l'atmosphère soit constituée en grande partie de l'azote (78%), cet azote atmosphérique, sans transformation, ne joue aucun rôle sur les organismes vivants. À l'intérieur d'un agroécosystème, on note les entrées, les sorties et le cycle interne de l'azote. Les entrées sont constituées de la fixation symbiotique, l'absorption par les bactéries, la dénitrification (réduction anaérobie des nitrates par les micro-organismes) et les précipitations. Pour les sorties, on a la dénitrification, l'érosion et le lessivage qui entraînent les ions NO_3^- , la volatilisation et le prélèvement des récoltes. Le cycle interne part de la plante aux décomposeurs à travers la litière ; à la formation de NH_4^+ à travers la minéralisation ; puis de NH_4^+ à NO_3^- à travers la nitrification, précédée de la nitritation (NO_2^-).

2.5.1 Symbiotes et symbiose

Le terme symbiose (ou vie en commun) a été créé par le botaniste Allemand H. A. de Bary, en 1879, à propos de l'association d'un champignon et d'une algue dans l'organisme des lichens. Au sens large, la notion de symbiose concerne toutes les formes de relations interspécifiques, depuis l'union réciproquement profitable jusqu'à l'antagonisme parasitaire. La symbiose désigne donc une association de deux organismes vivants différents, qui sont partenaires et dépendants l'un de l'autre. La fixation symbiotique de l'azote est assurée par les bactéries et les légumineuses ayant la leghémoglobine et qui forment une association indispensable à cette fixation. Les légumineuses constituent avec les orchidées et les composées, les trois grandes familles des plantes à fleur. Elles sont en effet les angiospermes dicotylédones dont les fruits sont des gousses et comptent environ 600 genres et 18 000 espèces qui peuvent être les herbes, les arbustes, les arbres et les lianes. Elles se subdivisent en trois sous familles : les Césalpiniacées (*Tamarindus indica*, ...), les Mimosacées (*Mimosa*, *Acacia*, *Leucaena*, ...) et les Papilionacées ou Fabacées (*Arachis*, *Crotalaria*, *Glycine*, ...). Les deux premières familles sont principalement tropicales et présentent peu d'intérêt en agriculture. Aussi, très peu d'espèces nodulent-elles chez les Césalpiniacées ; parmi ces légumineuses inaptées à la fixation de l'azote, on a *Senna siamea*, *Senna spectabilis*, *Moringii sistementhus*.

Par contre, les Papilionacées auxquelles appartient *Crotalaria juncea* constituent la plus grande famille, avec 12 000 espèces environ. Elles sont largement distribuées aussi bien en zone tempérée que tropicale, et ont un pouvoir de fixation symbiotique de l'azote important. Toutefois, certaines espèces non légumineuses telles que le Filao (*Casuarina equisetifolia*), famille des Casuarinacées, sont aptes à la fixation symbiotique de l'azote. Le Filao, plante actinorhizienne, fixe donc l'azote atmosphérique en symbiose avec un champignon du groupe des Actinomycètes, genre *Frankia*. Il fait partie des espèces anti-érosives, utilisées pour la végétalisation des berges et autres périmètres à écologie fragile. Boussingault J.-B. a démontré, en 1838, que les Lotoïdées ou Papilionacées (trèfle, pois, etc.) peuvent se développer normalement sur des sols sans nitrates parce qu'elles utilisent comme aliment azoté l'azote libre de l'air. On a découvert plus tard

(Helbriegel et Wilfarth, 1886-1889) que cet extraordinaire pouvoir, dont disposent non seulement les Lotoïdées mais la plupart des Légumineuses, est la conséquence d'une symbiose au niveau de leurs racines, avec certaines bactéries du sol notamment *Bacillus radicolica* (Beijerinck, 1888) dont on a reconnu plus tard qu'elles constituent un genre spécial (*Rhizobium*). Le *Rhizobium* est donc une bactérie aérobie, gram négative, en forme de bâtonnet et présentant un flagelle polaire ou sub-polaire ou des flagelles péritriches qui lui confèrent sa mobilité. N'importe quel *Rhizobium* ne peut s'associer avec n'importe quelle Légumineuse : à chaque genre ou groupe de genres de Légumineuses correspond une espèce de *Rhizobium*.

La légumineuse peut parfaitement se développer sans la bactérie sur un sol stérilisé contenant, comme seule source d'azote, des nitrates ou sels ammoniacaux ; de même la bactérie peut proliférer sans légumineuse sur un milieu synthétique contenant une substance organique azotée (aminoacide, etc.) ; mais ni l'une ni l'autre, séparées, n'assimilent l'azote libre. Comme toutes les autres plantes, les légumineuses assimilent par contre l'azote du sol en transformant, grâce au nitrate réductase et au nitrite réductase, le NO_3^- en NH_4^+ : $\text{NO}_3^- + 8e^- + 10\text{H}^+ = \text{NH}_4^+ + 3\text{H}_2\text{O}$. De plus, elles fixent fréquemment, mais non obligatoirement l'azote atmosphérique par symbiose avec les *Rhizobium*. Ces deux mécanismes sont complémentaires, avec malgré tout une préférence pour le NO_3^- par rapport au N_2 , lorsqu'il est disponible en quantité suffisante dans le sol (Bayle, 1994). Cet auteur donne la classification des *Rhizobium*, avec les différentes plantes spécifiques (Tableau 5).

Tableau 5 : Spécificité des *Rhizobium* avec les plantes hôtes (Bayle, 1994)

Espèces de <i>Rhizobium</i>	Biovar	Plantes hôtes
<i>Bradyrhizobium japonicum</i>	-	<i>Glycine soja</i> , <i>Glycine max</i>
<i>Bradyrhizobium elkanii</i>		<i>Glycine max</i>
<i>Bradyrhizobium</i> sp. (groupe de cowpea)		<i>Vigna</i> sp., <i>Lipinus</i> sp., <i>Acacia</i> sp., <i>Mimosa</i> sp., <i>Aeschynomene</i> sp.
<i>Rhizobium leguminosarium</i>	<i>vicia</i>	<i>Pisum</i> , <i>vicia</i> , <i>Lathyrus</i> , <i>Lens</i>
	<i>trifolii</i>	<i>Trifolium</i>
	<i>phaseoli</i>	<i>Phaseolus</i>
<i>Rhizobium tropici</i>		<i>Phaseolus vulgaris</i> L., <i>Leucaena</i> sp.
<i>Rhizobium etli</i>		<i>Phaseolus vulgaris</i>
<i>Rhizobium loti</i>		<i>Lotus</i> sp.
<i>Rhizobium galegae</i>		<i>Galega</i> sp.
<i>Rhizobium huakuii</i>		<i>Astragalus sinicus</i>
<i>Rhizobium ciceri</i>		<i>Cicer arietinum</i>
<i>Azorhizobium caulinodans</i>		<i>Sesbania rostrata</i>
<i>Sinorhizobium meliloti</i>		<i>Medicago</i> , <i>Melilotus</i> , <i>Trigonella</i> , <i>Glycine max</i> .
<i>Sinorhizobium fredii</i>		<i>Sesbania</i> , <i>Acacia</i> , <i>Neptunia</i>
<i>Sinorhizobium teranga</i>		<i>Leucaena</i>
<i>Sinorhizobium saheli</i>		<i>Sesbania</i> , <i>Prosopis</i>

En effet, les *Bradyrhizobium*, sont des bactéries qui ont un temps de génération supérieur à 6 heures. Elles n'ont qu'un seul flagelle polaire ou sub-polaire et alcalinisent certains milieux. Les *Azorhizobium* sont des souches qui peuvent former des nodosités sur les tiges et les racines de certaines légumineuses. Les *Sinorhizobium*, ont une croissance rapide et sont pour la plupart originaires d'Asie du Sud-Est. Et lorsque certaines souches spécifiques de *Rhizobium* ne sont pas naturellement présentes dans les sols, on procède à leur inoculation. Ce qui consiste à enrober les semences avec un grand nombre de *Rhizobium* vivants, spécifiques aux espèces botaniques pour stimuler une nodulation rapide et efficace. Des précautions doivent cependant être prises lors de cette opération, notamment la non-exposition de l'inoculum à la chaleur ou à trop de lumière. L'inoculant se présente la plupart du temps sous forme de poudre, à mélanger avec un

additif lui permettant d'adhérer aux graines. Le semis doit ensuite se faire rapidement après inoculation. La valeur des légumineuses dans le maintien et l'amélioration de la fertilité des sols est donc indéniable, notamment dans l'augmentation de la teneur du sol en azote à travers la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Le genre *Rhizobium* a aussi des souches telles que *Rhizobium japonicum* (souche cowpea) chez la crotalaire et *Rhizobium phaseoli* chez le haricot. Ainsi, ces bactéries dont certaines ne fixent pas l'azote, vivent libres dans le sol et sont attirées vers les racines des légumineuses au stade plantule. Ces microorganismes bénéfiques pour l'accroissement de la fertilité des sols sont aussi appelés biofertilisants et peuvent être cultivés au laboratoire puis incorporés aux sols directement enrobés autour des semences : c'est l'inoculation des biofertilisants.

2.5.2 Processus de fixation symbiotique de l'azote atmosphérique

La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique obéit à un processus bien défini. Dans les conditions naturelles, 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, comme le ferait un parasite, 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. Les cellules envahies se défendent en ébauchant une phagocytose des bactéries, traduite par l'altération des formes de celles-ci (formes dites d'involution), qui s'épaississent et se ramifient. À ce moment de la lutte entre le *Rhizobium* infectant et la légumineuse qui résiste, la nodosité constitue une unité fonctionnelle capable de réaliser ce que ni la bactérie ni la légumineuse ne peuvent faire séparément : l'assimilation de l'azote libre. La symbiose légumineuse-*Rhizobium* est beaucoup plus étroite que la symbiose mycorrhizienne. Les deux constituants sont encore capables de vivre indépendamment. Cependant, leur union produit un organe morphologiquement banal (une galle), mais physiologiquement très spécialisé : la nodosité ; celle-ci n'est ni légumineuse ni bactérie et fonctionne en effectuant des opérations biochimiques absolument originales. La

pénétration des bactéries dans les racines est favorisée par les lectines et leur multiplication s'arrête généralement lorsque les bactéries sont 40 fois plus grosses qu'à leur pénétration ; on les appelle alors les bactéroïdes. Les lectines sont en effet des substances organiques stimulées et secrétées par les racines des légumineuses lorsqu'elles sont en contact avec le *Rhizobium*. En réponse aux lectines secrétées, les *Rhizobium* se multiplient activement et forment un cordon d'infection. Ces *Rhizobium* sécrètent à leur tour des substances hormonales qui induisent la déformation de nombreux poils absorbants, qui prennent l'aspect d'une courbure. Les *Rhizobium* ne sont pas éparpillés dans les cellules hôtes, mais enfermées dans des vésicules qui sont délimitées par une paroi dite bactéroïdienne où s'établit la symbiose (Figure 10).

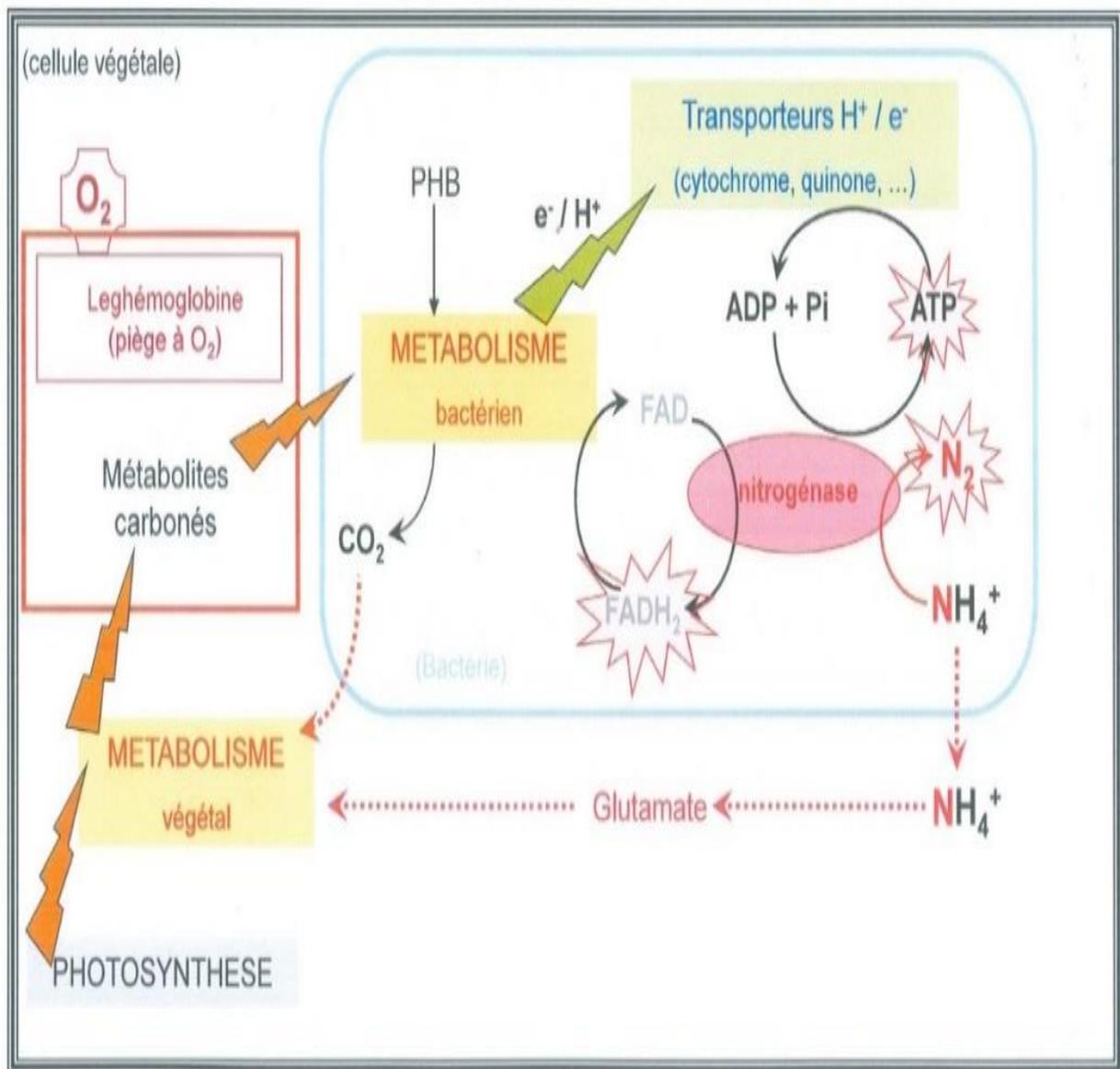


Figure 10 : Schéma de la fixation symbiotique de l'azote (LP AGEPUR, 2015)

En somme, plusieurs étapes jalonnent donc le processus de fixation d'azote :

- Absorption des bactéries sur les racines

L'absorption des *Rhizobium* sur les racines de la plante hôte est un phénomène de reconnaissance cellulaire faisant intervenir des récepteurs de surface chez les deux partenaires de la symbiose. Des expériences ont permis de montrer que les *Rhizobium* s'attachent en quelques minutes en général de façon polaire sur les cellules corticales et les poils absorbants à l'extrémité de la racine de leur hôte (Turgeon et Bauer, 1982).

- Infection et genèse de la nodosité

L'infectivité varie d'une souche à l'autre et peut présenter des degrés très variables. A l'intérieur du poil absorbant, les *Rhizobium* sont entourés par un cordon d'infection, qui traverse les cellules corticales. Lorsque le cordon d'infection est sur le point d'atteindre une cellule tétraploïde préexistant dans le cortex, il y a stimulation de la division de cette cellule tétraploïde et des cellules voisines.

- Maturité nodulaire

Les *Rhizobium* sont libérés dans le cytoplasme des cellules de l'hôte par une invagination du plasmalemme du cordon, qui constituera la membrane enveloppe des bactéries. Ces dernières se transforment ensuite en bactéroïdes (Denarie et Truchet, 1979). C'est au cours de cette phase que la leghémoglobine se forme colorant en rose la zone infectée et que l'azote moléculaire est fixé (Dommergues et Mangenot, 1970).

- Phase de dégénérescence

La dégénérescence de la nodosité se propage du centre à la périphérie, elle se manifeste par la lyse des bactéroïdes et la disparition de la leghémoglobine, cette phase aboutit à la libération des bactéries dans le sol (Bouaboub, 1991).

La nodosité d'une légumineuse est donc le siège de la fixation symbiotique de l'azote. Elle est le résultat d'interactions fort complexes entre le partenaire bactérie (*Rhizobium*) et la racine à laquelle il s'est spécifiquement associé (Rigaud et Gadal, 1985). Une nodosité comporte, en allant de l'extérieur vers l'intérieur, l'épiderme et le cortex externe, le parenchyme nodulaire (appelé antérieurement cortex interne), qui renferme les tissus vasculaires et la zone centrale infectée, qui est le siège de la fixation de la N₂. Dans cette zone, toutes les cellules ne sont pas infectées, sauf chez certaines espèces comme *Arachis hypogaea* et *Sesbania rostrata* (Dommergues *et al.*, 1999). Les formes

de nodosités d'après Boulard *in* Bounaama (2014) sont soit sphériques chez le soja ; bifurquées chez la luzerne ; globuleuses chez le pois et ovoïdes chez le trèfle blanc.

On distingue par ailleurs deux types de nodosités : les nodosités indéterminées, qui comportent un méristème nodulaire persistant, et les nodosités déterminées, chez lesquelles ce méristème n'existe pas. Le méristème étant un ensemble de cellules en voie de division qui se perpétue tel quel et non simplement un ensemble de cellules qui se divise activement pendant un certain temps pour se différencier ultérieurement. Le type de nodosité formé est déterminé par la plante hôte et non par la souche de *Rhizobium*. Les nodosités déterminées existent chez les légumineuses comme le soja, l'organogenèse nodulaire débute par des divisions des cellules corticales externes de la racine (Newcomb *et al.*, 1979). Les nodosités indéterminées ont d'abord été décrites chez des espèces tempérées comme le pois et la luzerne ; on les a ensuite découvertes chez *Mimosa scabrella* et *Leucaena leucocephala* (Dommergues *et al.*, 1999).

La taille et la forme des nodosités varient considérablement. La croissance et l'efficacité des nodosités sont influencées par le rapport C/N de la plante et la présence dans le sol du P, Ca, Mg, Mo et Bo. La présence et le nombre de nodosités ne sont pas forcément une indication de leur efficacité. Lorsque les nodosités ne sont pas efficaces, les bactéries deviennent les parasites de la plante hôte pour l'azote et la plante doit prélever dans le sol de l'azote pour elle-même et pour les bactéries. Dans ce cas, la plante épuise plus rapidement l'azote du sol. Une nodosité inefficace est généralement de petite taille, dur, sphérique et sa coupe présente une couleur verdâtre ou blanchâtre. Les nodosités efficaces contiennent un pigment rose appelé leghémoglobine, qu'on peut observer après une coupe transversale des nodosités. Ce n'est qu'en présence des bactéroïdes et de la leghémoglobine que commence la fixation symbiotique ; ainsi, la légumineuse fournit les substances carbonées aux *Rhizobium* et ceux-ci fournissent l'azote fixé à la plante. La leghémoglobine quant à elle fournit aux bactéroïdes l'oxygène nécessaire pour leur respiration.

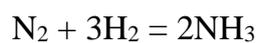
Au final, l'azote total proviendra en partie du sol et en partie de la fixation symbiotique. L'utilisation de marqueur permet de connaître l'origine de cet azote. Ainsi, la part de l'azote provenant de la fixation symbiotique varie de 30 à 100 % en fonction des espèces

(les légumineuses prairiales seraient d'ailleurs plus efficaces que les légumineuses à graines) et des conditions pédoclimatiques et parcellaires. Sans facteur limitant, la légumineuse pilote sa fixation symbiotique en fonction de ses besoins de croissance pour une nutrition azotée optimale. En fonction des conditions, la légumineuse pure va puiser l'azote du sol ou fixer l'azote de l'air. Ceci met en évidence le rôle tampon des légumineuses (Solag, 2016). L'assimilation de l'azote est donc son incorporation dans les structures organiques sous forme de NO_3^- ou de NH_4^+ . Les NO_3^- sont d'abord réduits en NH_4^+ avant leur incorporation et cette réduction passe par le nitrite NO_2^- , sous la catalyse de l'enzyme appelée nitrate réductase. L'ammoniac produit dans les nodosités est transformé en composés organiques, qui sont soit des acides aminés : leucine, valine, acide aspartique, soit des amides : glutamine, asparagine. L'asparagine, qui peut contenir 50 à 80% de l'azote fixé, est le principal produit qu'on retrouve chez les légumineuses et 80 à 90% de cet azote est transféré à la plante hôte à travers le xylème ; le reste (10 à 20%) est excrété dans le milieu généralement sous forme d'exsudats d'acides aspartique ou glutamique (CIRAD-GRET, 2002). C'est ainsi que les légumineuses contribuent à l'enrichissement du sol en azote.

2.5.3 Facteurs de fixation de l'azote atmosphérique

La fixation symbiotique de l'azote atmosphérique n'est possible que grâce à la combinaison d'un certain nombre de facteurs dont la présence de souches efficaces de *Rhizobium*, la présence de la leghémoglobine et de la nitrogénase, l'activité photosynthétique, la présence d'azote minéral au sol et des conditions microclimatiques favorables. La FAO (1992) note en plus comme facteurs : des conditions favorables au développement de la plante (climat, absence de maladies, ...) ; un sol bien aéré pour la croissance des bactéries ; pas de carence en molybdate et bore qui sont les deux cofacteurs de la nitrogénase ; et enfin, l'azote combiné au sol, qui diminuerait la fixation d'azote atmosphérique. Solag (2016) quant à lui indique relève en outre un bon développement racinaire de la légumineuse au départ, avec suffisamment d'azote dans le sol pour l'initiation. Ainsi, la réunion de toutes les conditions optimales permet à l'association *Rhizobium*-légumineuse, de fournir à la plante jusqu'à 90 % de l'azote dont elle a besoin (AABNF, 1990).

Les *Rhizobium* sont généralement spécifiques de l'hôte qu'ils infectent, bien qu'une même légumineuse puisse être inoculée par plusieurs souches bactériennes différentes. Ces microorganismes sont sensibles à certains facteurs du milieu tels que la température, la salinité et l'acidité du sol ainsi que sa teneur en matière organique, favorable à la vie bactérienne (Beunard, 1984). Les *Rhizobium* se multiplient en même temps que les cellules de la plante hôte. En effet, la plante sécrète donc dans le sol des flavonoïdes qui sont perçus par le *Rhizobium* via une protéine régulatrice (*nodD*). Celle-ci déclenche l'expression des gènes *nod* (*nod* pour nodulation) aboutissant à la synthèse d'une molécule signal : le facteur nod. Les gènes *nodA*, *nodB* et *nodC* sont requis pour la synthèse du squelette de base du facteur nod, consistant en un dérivé lipochito-oligosaccharidique (Giraud, 2007). C'est dans ces nodosités, grâce à la nitrogénase des bactéroïdes du *Rhizobium*, que se fera la fixation d'azote atmosphérique par réduction du N₂ en NH₃ :



Une hémoprotéine, la leghémoglobine, synthétisée dans le nodule, permet l'approvisionnement du bactéroïde en O₂, source d'énergie indispensable à la fixation de l'azote de l'air. En général, la fixation symbiotique peut être perturbée par des facteurs d'origine externe liée au milieu et interne liée au *Rhizobium* et à la plante hôte. Comme facteurs internes, il est à noter que chaque espèce de *Rhizobium* ne peut infecter qu'une gamme bien précise des espèces de légumineuses, cette gamme peut être large comme chez la souche « *Rhizobium sp. NGR234* », et peut être très étroite comme chez la souche « *Sinorhizobium meliloti* » qui ne sont actives que sur les racines de la luzerne (François et Gaudry, 1997). De nombreux travaux démontrent que la fixation symbiotique ne peut s'exprimer que si le *Rhizobium* présente un grand pouvoir d'infectivité des racines et aussi génétiquement compatible avec sa plante hôte. Selon une expérience faite pour déterminer la présence et l'efficacité des *Rhizobium* autochtones spécifiques des légumineuses alimentaires cultivées en Tunisie, il a été démontré que le taux de la fixation symbiotique exprime le degré de l'affinité génotypique entre les deux partenaires puisque pour une même variété de légumineuse, l'inoculation avec différents isolats engendre des rendements largement différents (Dahmane *et al.*, 1995) in Bounaama (2014).

Les facteurs externes affectant la fixation symbiotique comportent la température, la lumière, l'eau, la salinité, le pH, les métaux lourds et certains éléments nutritifs des plantes comme l'azote. D'après Saxena et Singh (1987) Wery (1987), les extrêmes de températures affectent sérieusement la fixation d'azote et l'infection racinaire. Selon une expérience faite sur l'effet de température sur la fixation et l'assimilation de l'azote chez le pois chiche, il a été démontré que l'activité nitrates réductase, l'activité réductrice d'acétylène (ARA) ainsi que la teneur en nitrate du pois chiche sont sensibles à l'action directe de température. En effet, des plants de pois chiche soumis à des températures extrêmes développent une ARA faible, en revanche des températures moyennes de l'ordre de 25°C semblent favoriser cette activité (Kichou et Sahraou, 2001). Pour la lumière, il existe une relation entre l'intensité lumineuse, la photosynthèse, la nodulation et la fixation. La lumière intervient indirectement sur la fixation d'azote, en effet, un point d'éclairement accroît à la fois le nombre de nodules et la fixation d'azote (Lawn et Brun, 1974). Le déficit hydrique provoque quant à lui une diminution de poids frais, du nombre des nodules et de l'ARA (Chebouti et Abdelgherfi, 2000). Bounaama (2014) démontre que les grosses nodosités sont capables de résister mieux au déficit hydrique et maintenir une bonne activité nitrogénase que les petites nodosités et cela est dû à la présence d'un parenchyme cortical plus épais qui empêche ou réduit leur déshydratation. En ce qui concerne la salinité, la nodulation en général est inhibée si la salinité atteint 8 mmhos/cm. Ce phénomène se caractérise davantage par une diminution du nombre de nodosités que par une réduction de leur poids (Sinha, 1980 *in* Labassi, 1991). Selon Dommergues et Mangenot (1970), l'acidité peut provoquer une mauvaise assimilation des éléments minéraux à cause de la toxicité allumique et manganique et une diminution de l'absorption de calcium et de molybdène. Le pH neutre ou légèrement alcalin semble donc plus favorable au phénomène de la nodulation et de la fixation de l'azote. Lorsque la plante est nodulée, la fixation d'azote elle-même est peu sensible au pH, car la plante renferme un système efficace de régulation interne du pH (Bounaama, 2014).

Pour le facteur azote, l'existence de nitrates et des ions ammoniums en abondance dans le sol inhibe la fixation symbiotique (Heler *et al.*, 2007) *in* Bounaama (2014). Pour Maze *in* Duculot (1932), lorsque le milieu nutritif est suffisamment pourvu en nitrates, les

sucres sont utilisées pour la synthèse albuminoïde ; il n'en reste plus assez pour jouer dans les poils radiculaires un rôle attractif sur le microbe. Ainsi, elles provoquent l'avortement du cordant d'infection lors des stades précoces d'initiation qui va entraîner une diminution du nombre des nodules par plante (François et Gaudry, 1997). Malgré tout ça, il est conseillé d'apporter une faible dose de nitrate au début de cycle de croissance des légumineuses pour couvrir l'insuffisance de la fixation d'azote liée à la mise en place progressive des nodules. Le phosphore est un élément reconnu comme étant indispensable à la vie du monde végétal. Ceci signifie qu'en son absence le développement de toute forme de vie végétale n'est réalisable (Labassi, 1991). Les travaux de Mengel *et al.*, (1974) sur la fève montrent que les doses croissantes de potassium apportées à la plante augmentent significativement le nombre et le poids des nodules. Les oligoéléments comme le fer, le cuivre, le cobalt, le molybdène et le bore sont nécessaires à des doses infiniment faibles (Soltner, 2001). Le molybdène et le fer jouent un rôle important dans le fonctionnement de la nitrogénase (Heller *et al.*, 2007).

2.5.4 Indicateurs de fixation d'azote

Les indicateurs de fixation symbiotique d'azote sont entre autres la teneur en uréides et en acides aminés ; l'activité de la nitrogénase ; la coloration de la leghémoglobine, le nombre de nodosités efficaces. En effet, la réaction de la fixation de N_2 est catalysée par un complexe enzymatique appelé nitrogénase, qui est constitué de deux composantes : (i) la protéine molybdo-ferrique ou dinitrogénase, cette protéine est le site de réduction de N_2 , c'est un tétramère de poids moléculaire de 245 KD (KiloDalton), 1 KD représentant la masse d'un atome d'hydrogène, soit 1,00794 u ou 1g ; (ii) et la ferroprotéine ou dinitrogénase-réductase, cette deuxième protéine fournit les électrons à la dinitrogénase, c'est un homodimère de poids moléculaire 64 KD. Ces deux protéines sont conservées chez tous les organismes fixateurs de N_2 , les électrons nécessaires à la réaction sont fournis par un puissant donneur d'électrons, la dinitrogénase-réductase accepte un électron et se complexe avec deux molécules de Mg-ATP, puis s'associe avec la dinitrogénase pour former un complexe enzymatique actif. Il y a transfert d'un électron de la dinitrogénase-réductase à la dinitrogénase et simultanément, il y a libération de deux molécules de Mg-ADP et de phosphate. Puis les deux composants de la nitrogénase se séparent et la dinitrogénase-réductase est prête à recommencer le

transport d'un électron vers la dinitrogénase. Lorsque la molécule de dinitrogénase est suffisamment réduite, le substrat N_2 est réduit en NH_3 . La réduction de protons en H_2 se produit en même temps que la réduction de N_2 , et requiert autant de protons qu'il y a d'électrons impliqués dans la réduction de N_2 . L'azote ammoniacal formé est ensuite incorporé dans le glutamate, puis suit des voies métaboliques diverses (Dommergues *et al.*, 1999).

La leghémoglobine en abrégé LegHb (Figure 11) est une hémoprotéine fixatrice de l'azote atmosphérique présente chez les Fabacées et qui a une structure très proche de l'hémoglobine des animaux. Elle est isolée en 1939 par H. Kubo et on la trouve dans des nodosités de la racine lors de phénomènes de symbioses bactériennes (bactéries du genre *Rhizobium*). Cette protéine est synthétisée par la légumineuse hôte et permet de protéger un complexe enzymatique (nitrogénase/hydrogénase) des effets du dioxygène qui l'inactive et constitue une réserve d'oxygène pour les bactéries (activité aérobie). Elle n'est synthétisée que dans les nodosités, où elle peut représenter 40 % des protéines présentes. De couleur rouge, la leghémoglobine confère aux nodosités une couleur rose caractéristique et ces nodosités sont dites efficaces ou aptes à la fixation symbiotique de l'azote. Lorsque l'intérieur de ces nodosités après une coupe est blanc, vert ou noir, ces nodosités sont dites inefficaces. Ce pigment est élaboré dans les cellules de l'hôte, pigment protégeant de l'oxygène (nitrogénase) réducteur de l'azote. L'ammoniac formé se combine avec un sucre : un aminoacide immédiatement assimilable est donc synthétisé (Cachan et Mangenot, 2010).

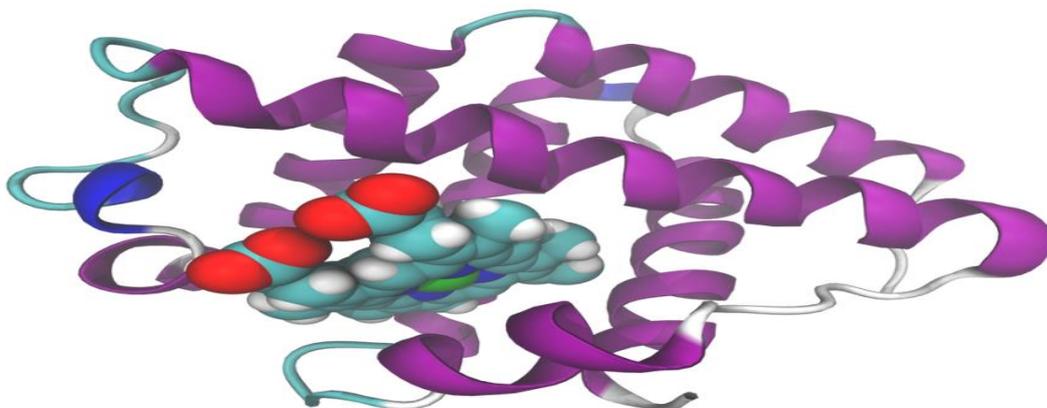


Figure 11 : Leghémoglobine de soja complexée avec le nicotinate
(www.google.cm/search=leghémoglobine)

Il existe par ailleurs un lien entre la couleur rouge du sang et celle des nodosités actives. Tout comme les globules rouges, les nodosités sur les racines des légumineuses contiennent de l'hémoglobine (Hb). En fait, il s'agit de leghémoglobine (« leg » pour légumineuse). Dans le sang, la protéine Hb sert à transporter l'oxygène (O₂) pour approvisionner les organes. Lorsque l'O₂ est capté par l'Hb, le globule prend la couleur rouge. Le sang « usé » est plutôt foncé puisqu'il a cédé son O₂ aux organes du corps. En circulant près des poumons il se recharge à nouveau d'O₂ pour continuer d'accomplir ses fonctions (Doucet, 2006). Dans le cas des nodosités, la LegHb retient l'oxygène pour qu'il ne soit pas disponible en grande concentration aux *Rhizobium*, mais juste assez pour que ces bactéries puissent respirer. Le désavantage d'avoir trop d'O₂ présent, c'est qu'il nuit au fonctionnement d'une autre protéine (une enzyme) que les *Rhizobium* fabriquent pour capter l'azote atmosphérique (N₂), gaz très stable, et de le transformer sous une forme d'azote facilement utilisable par la plante. La couleur rose se justifie par le fait que la protéine d'hémoglobine renferme en son centre un atome de fer. Un fait aussi intéressant, la molécule d'Hb ressemble de près à celle de la chlorophylle. Or, les plantes sont vertes et non pas rouges en général. Il en est ainsi parce que le cœur de la molécule de chlorophylle n'est pas constitué de fer, mais plutôt de magnésium. La molécule renvoie une coloration verte puisqu'elle absorbe le rouge et le bleu contenus dans le rayonnement solaire (Sarrantonio, 1994).

2.6 Valeur de remplacement en fertilisant azoté

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer la fixation symbiotique d'azote par les légumineuses. Ces dernières ont été revues par Bergersen (1980) et Hardarson et Danso (1993). Les méthodes les plus courantes sont fondées sur le poids de la matière sèche des parties aériennes, la différence d'azote total, l'importance des nodosités efficaces, la réduction de l'acétylène, le dosage des composés azotés dans le xylème ou l'utilisation de traceurs isotopiques, et la coloration des bactéries. Le choix d'une méthode dépend des objectifs de l'expérience et des ressources disponibles. La coloration en Gram des bactéries permet de mettre en évidence les propriétés de la paroi bactérienne et d'utiliser ces propriétés pour les distinguer et les classer. Son avantage est de classer les bactéries en deux grands groupes : bactéries Gram+ et bactéries Gram-. Cette coloration

est faite à partir des cultures où l'on prépare une lame bien étalée en couche mince, séchée puis colorée avec le violet de Gentiane suivi du Lugol. La valeur des méthodes non isotopiques souffre de nombreuses contestations. Ainsi, Hesteman *et al.* (1979) soulignent que la valeur de remplacement en fertilisant azoté (VRFA) surestime l'apport d'azote des légumineuses. En général, les méthodes faisant usage de l'azote maqué indiquent que l'utilisation de l'azote d'une légumineuse précédente est plutôt faible.

La détermination de la contribution de l'azote résiduel d'une légumineuse au rendement ou d'une non-légumineuse subséquente peut aussi être faite par la technique de traçage isotopique (Senaratne et Hardarson, 1988 ; Chalk *et al.*, 1993). Un engrais azoté enrichi ou appauvri en ^{15}N est appliqué à une non-légumineuse en monoculture et après un précédent de légumineuse. Dans le cas d'un engrais appauvri en ^{15}N , si la légumineuse contribue de façon significative à la nutrition azotée de la culture subséquente, la valeur d'excès atomique (e.a.) ^{14}N du grain qui suit cette légumineuse devrait être plus faible que la valeur d'e.a. ^{14}N de la non-légumineuse en monoculture (dilution isotopique). De même, si la légumineuse contribue de façon significative au rendement de la non-légumineuse subséquente, le rendement devrait être supérieur dans un système de rotation avec la légumineuse par rapport à la non-légumineuse en monoculture. Une partie de l'azote fixé par les légumineuses retourne dans le sol sous forme organique (Mvondo Awono, 1997). Ladd et Amato (1986) ont observé qu'environ 60 à 65 % de l'azote des résidus des légumineuses restait dans le sol après 32 semaines de décomposition au champ. Harris et Hesterman (1990) rapportent qu'après incorporation de résidus de luzerne, 46 % en moyenne de l'apport initial est recouvert par le sol et 96 % de cet azote retenu est sous forme organique dont 28 % intégré à la biomasse microbienne. Les légumineuses contribuent ainsi au réapprovisionnement des réserves du sol en N organique. La contribution de cet azote aux cultures subséquentes serait graduelle, comparativement aux fertilisants azotés (Chalifour, 1993).

L'une des caractéristiques importantes des légumineuses est leur capacité de fixer l'azote atmosphérique à travers les symbioses avec des bactéries telluriques. Il s'agit en particulier des bactéries des genres *Rhizobium* et *Bradyrhizobium* (Paré et Chalifour, 1993). Lorsque la symbiose est effective, la légumineuse n'utilise alors que très peu d'azote minéral. La valeur de remplacement en fertilisant azote (VRFA) est une méthode

abondamment utilisée pour déterminer la contribution des légumineuses dans la nutrition azotée des cultures subséquentes. La base du concept de VRFA est la quantité de fertilisant azoté requise par une culture subséquente de non-légumineuse pour obtenir un rendement équivalent ; celui-ci est obtenu après incorporation d'une légumineuse et, sans application d'engrais (Hesterman, 1990). La méthode comporte dans un premier temps, l'établissement d'une courbe de réponse de la non-légumineuse dont le maïs, en utilisant plusieurs doses d'azote minéral et ensuite, de comparer les rendements de la non-légumineuse obtenus suite ou parallèle à une culture de légumineuse (par exemple la crotalaire) et sans apport d'azote, et ceux de la courbe de réponse au fertilisant azoté. Ce concept a été utilisé par Paré *et al.* (1992) au Québec pour déterminer la VRFA d'une ou deux années de féverole ou de soja pour la production de maïs-fourrage. Le crédit d'azote est diminué d'une valeur équivalente à celle de l'engrais de démarrage lorsque ce dernier est appliqué (Decker *et al.*, 1993).

2.7 Nutrition minérale des plantes

Prélevés par les poils absorbants de la plante à travers l'osmose, les éléments nutritifs sont véhiculés dans les plantes (maïs, sorgho, coton, soja, arachide, ...) à travers l'eau du sol et sont indispensables à leur physiologie et la qualité chimique et biologique des eaux dépend des propriétés des sols (CIRAD-GRET, 2002). Mathématiquement parlant, les mouvements de la solution nutritive obéissent à la loi de Poiseuille ou de Darcy dont le flux est égal à la force motrice divisée par les résistances ; les résistances étant toutes les barrières que l'eau ou la solution traverse avant d'arriver au xylème. Le déficit ou stress hydrique réduit la fixation du CO₂ en augmentant la résistance ostiolaire, qui se traduit par la fermeture des stomates. La plante puise dans le sol, non seulement l'eau mais aussi les éléments dont elle a besoin pour sa croissance. Ces éléments essentiellement minéraux, sont prélevés de façon sélective. Mais, cette sélection n'est pas parfaite parce que ce ne sont pas tous les éléments trouvés dans des végétaux qui leur sont nécessaires. En fonction de l'augmentation de la concentration de chaque élément, on parle de zone de déficience, de zone adéquate qui correspond à une consommation de luxe et de zone de toxicité liée à l'excès.

L'absorption d'un ion donné est influencée par la concentration de cet ion dans le milieu et la présence d'autres ions. La cinétique d'absorption des ions ressemble à une cinétique enzymatique classique. Ainsi, moins le composé est représenté, plus vite il est absorbé. Il peut avoir une inhibition compétitive de l'absorption d'un ion par un autre à l'exemple du Ca^{2+} et Mg^{2+} ou du Cl^- et I^- . Les sites récepteurs des ions dans les cellules absorbantes peuvent être saturés si la concentration des ions est très forte dans la solution du sol. Parfois, la présence d'un ion antagoniste dans la solution du sol empêche l'absorption de l'autre, sans qu'ils n'utilisent le même site, à l'exemple du Ca^{2+} et Na^+ ; du Ca^+ et K^+ ; du Ca^+ et Fe^{2+} et du Mg^{2+} et Na^+ .

Les migrations des constituants du sol peuvent être verticales ou latérales, sur des distances qui varient du micron à la centaine de mètres et sont facilitées par : (i) la finesse des particules : les argiles migrent beaucoup plus facilement que les limons et les sables ; (ii) la dispersabilité des particules : pour les particules argileuses, la présence, sur leur complexe absorbant, d'ions monovalents (H^+ , Na^+) facilite leur dispersion donc leur migration (cas de milieux acides ou très basiques) ; au contraire, la présence d'ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} : cas des milieux neutres ou légèrement basiques) ou trivalents (Al^{3+} : cas des milieux très acides) gêne leur dispersion donc leur migration ; (iii) la solubilité des constituants : les carbonates migrent plus facilement que les silicates, lesquels migrent plus facilement que les hydroxydes et (iv) la taille et la morphologie des vides (CIRAD-GRET, 2002).

Pour équilibrer le bilan chimique du sol ou lorsque les carences en minéraux sont accusées chez les plantes, l'apport des engrais minéraux sont souvent nécessaires pour accroître la productivité. On a ainsi principalement les engrais azotés, les engrais phosphatés et les engrais potassiques. Les engrais azotés qui proviennent de la synthèse de l'ammoniac, à partir de l'air et de l'hydrogène sont dits engrais ammoniacaux : l'urée ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), les engrais ammoniaco-nitriques comme les ammonitrates à moyen et à haut dosage et les engrais nitriques à l'instar du nitrate de calcium. En effet, les engrais nitriques (NO_3^-) sont peu toxiques pour les plantes par rapport aux engrais ammoniacaux. Avec le carbone, l'azote est l'aliment de base de la plante (constituant des éléments protidiques). L'azote est présent dans la nature en abondance soit à l'état

libre dans l'air dont il représente les 4/5^{èmes}, soit à l'état combiné sous forme minérale (ammoniacale ou nitrique) ou organique, notamment humique avec 5% d'azote (UNIFA, 2017). C'est le facteur déterminant des rendements par son influence favorable sur la croissance de l'appareil végétatif. L'azote, absorbé par la plante sous forme de NO_3^- ou de NH_4^+ , est l'élément de base des protéines, substances particulièrement importantes chez les êtres vivants, parce qu'elles sont les constituants essentiels du protoplasme. En effet, à la différence de l'azote ammoniacal NH_4^+ qui peut se fixer sur le complexe absorbant, les engrais azotés sous forme nitrique (nitrates NO_3^-) ne sont pas retenus par le sol : ils peuvent être ainsi entraînés par l'eau de ruissellement ou drainés vers les nappes phréatiques, et devenir polluants. L'azote est l'élément majeur des acides aminés, des acides nucléiques et de quelques coenzymes. Il agit sur le développement végétatif des plantes (tige, feuilles, racines). La déficience en azote se remarque facilement par une diminution de la croissance de la plante, qui prend un aspect grêle et dont les feuilles deviennent d'un vert nettement plus pâle, voir même jaunâtre : c'est la chlorose. Il peut aussi avoir la nécrose ou mort localisée des cellules, une chute précoce des feuilles, une maturité précoce et donc un raccourcissement du cycle de production mais aussi un faible rendement.

Un excès d'azote a comme résultat un développement végétatif intense et exubérant, causé par une formation exagérée de protoplasmes, avec parfois effet de phytotoxicité. Cela a pour conséquence l'affaiblissement des parois cellulaires de la plante, qui devient plus sensible aux maladies et résiste moins aux conditions atmosphériques. L'azote apporté au moment de la floraison par exemple, peut retarder celle-ci. L'azote est stocké dans le sol sous forme d'humus. On le trouve essentiellement sous 3 formes qui n'ont pas toutes la même valeur immédiate pour la plante : azote organique, azote ammoniacal, azote nitrique (qui constitue la fumure de couverture, immédiatement mobilisable par la plante). L'azote est le facteur déterminant des rendements par son influence favorable sur la croissance de l'appareil végétatif. Les pertes d'azote hors du profil cultural se font par lixiviation, par volatilisation, ou par dénitrification (CIRAD-GRET, 2002). L'azote joue donc un rôle déterminant à la fois sur le rendement et sur les qualités des productions. Il joue un rôle essentiel dans la synthèse de la matière

vivante (protéines, chlorophylle, enzymes, ...) à partir de la matière minérale (UNIFA, 2017). Il est en effet l'un des constituants de la chlorophylle qui commande l'opération fondamentale de la photosynthèse. L'azote minéral est transformé dans la plante en acides aminés puis en protéines indispensables pour l'alimentation des animaux et de l'homme. Les animaux ne peuvent absorber ni l'azote de l'air, ni directement l'azote minéral. Ce sont les végétaux qui leur fournissent sous forme organique la plus grande partie de l'azote dont ils ont besoin (UNIFA, 2017).

Les engrais phosphatés peuvent provenir des roches sédimentaires, des roches éruptives à cadmium, de la poudre d'os calciné ou du guano qui lui résulte de l'évolution des déjections d'oiseaux de mer sur des îlots. Suivant leur solubilité, on a les engrais phosphatés insolubles, hyposolubles et solubles. Le phosphore (P) joue un double rôle de véhicule et de moteur dans la photosynthèse. Facteur de croissance et élément de qualité, il favorise le développement racinaire et la précocité, a un rôle essentiel dans la fécondation et la mise à fruit. Le P est disponible dans le sol sous forme d'ions phosphoriques. Il est présent en grande quantité sous formes minérale et organique qui sont moins disponibles pour la plante. On rencontre principalement 3 formes de phosphore : (i) la forme soluble qui a toujours tendance à se lier à un cation : Ca, Fe, Al ; (ii) les formes combinées où le P se trouve sous forme d'hydroxyde d'Al et de Fe et peut être libéré par l'apport d'humus ; (iii) les formes insolubles où le P est engagé dans les combinaisons insolubles par des réactions irréversibles. Le phosphore est un facteur important de croissance. Il intervient dans le transport d'énergie dans la plante, c'est un constituant des cofacteurs transporteurs d'énergie (ATP, GTP, UTP) et des composés phosphorylés (triose phosphate et hexose phosphate). Il favorise le développement racinaire, la fécondation, la floraison, la maturation des graines et la migration des réserves. Le P joue aussi un double rôle de véhicule et de moteur dans la photosynthèse. Facteur de croissance et élément de qualité, il favorise en plus du développement racinaire, la précocité. Son rôle essentiel dans la fécondation et la mise à fruit, fait du P un facteur essentiel de l'hérédité de la graine. Une déficience en P affecte donc la formation des fruits et des graines (CIRAD-GRET, 2002).

Les engrais potassiques, entièrement solubles dans l'eau, sont exploités à partir des gisements de potasse, constitués de roches provenant de l'évaporation de l'eau de mer au cours des temps géologiques. Le plus gros gisement actuellement en exploitation est au Canada. Le minerai habituel est la sylvinite, un mélange de KCl et NaCl, dont on extrait le KCl, engrais potassique le plus utilisé et on rejette en général le NaCl. La potasse intervient comme régulateur des fonctions (forte proportion dans les organes jeunes), dans l'assimilation chlorophyllienne en favorisant la synthèse et l'accumulation des glucides, des acides aminés. C'est donc un élément important pour les plantes à tubercules et à racines. Elle permet une meilleure économie de l'eau dans les tissus, leur donne une plus grande rigidité contre la verse, accroît la résistance des végétaux aux pathologies cryptogamiques. Le potassium (K) est un élément d'équilibre, de santé et de qualité. Le K est le cation le plus abondant dans la chlorophylle et le seul dont l'absorption est active. Il intervient dans la création de la pression osmotique, le maintien de la turgescence et de l'équilibre acido-basique. Il intervient aussi dans la réduction des nitrates, dans la synthèse des protéines et dans les divisions cellulaires. Il joue un rôle déterminant dans l'ouverture et la fermeture des stomates. Il est utilisable par la plante, soit immédiatement, soit après échange, lorsqu'il est d'abord adsorbé sur le complexe argilo-humique.

Le potassium n'a pas autant de formes que l'azote. Il est simplement absorbé sous forme ionique (K^+). Il est présent dans la plante sous forme de cations. Il participe à la pression osmotique du suc cellulaire et dans les échanges intercellulaires, puis dans le transport des produits de synthèse. Il favorise ainsi la synthèse des glucides, des acides aminés et la migration de ces substances dans les organes de réserve. C'est donc un élément important pour les plantes à tubercules et à racines. La potasse intervient comme régulateur des fonctions (forte proportion dans les organes jeunes), dans l'assimilation chlorophyllienne en favorisant la synthèse et l'accumulation des glucides et acides aminés. Il permet une meilleure économie de l'eau dans les tissus, leur donne une plus grande rigidité contre la verse, accroît la résistance des végétaux aux pathologies cryptogamiques. Le potassium est un élément d'équilibre, de santé et de qualité (CIRAD-GRET, 2002).

Les autres éléments ont également un rôle important au niveau de la physiologie des plantes :

- le calcium (Ca), le plus souvent envisagé comme amendement, joue un rôle non négligeable dans la physiologie de la plante, surtout en fonction des rapports Ca/Mg et Ca/K ;
- le magnésium (Mn) est un élément constitutif de la chlorophylle et joue un rôle important dans l'agrophysiologie ;
- le soufre (S), activateur de la respiration, est un constituant de certaines protéines et enzymes ;
- le sodium (Na), indispensable à certaines plantes (coton par exemple), semble suppléer le K dans certains cas et le libérer pour d'autres fonctions plus électives ;
- le bore (B) joue un rôle important dans la division des cellules (enracinement, jeunes pousses, germination du pollen, formation des fruits) et la migration des éléments dans la plante, mais lui-même ne migre pas (action catalytique) ;
- le fer (Fe) entre dans la constitution de diverses enzymes et joue un rôle de catalyseur dans la formation de la chlorophylle ;
- le manganèse (Mn) est important dans la formation de la chlorophylle, la réduction des nitrates et la respiration, et sert de catalyseur du métabolisme (synthèse des protéines et de la vitamine C) ;
- le cuivre (Cu) dont la carence entraîne une chlorose, surtout sensible en longue période de sécheresse ;
- le zinc (Zn) dont la carence se manifeste surtout en cultures fruitières ;
- le molybdène (Mo) joue un rôle dans l'assimilation des nitrates et dans la fixation symbiotique de l'azote de l'air ;
- le cobalt (Co) est nécessaire à l'élaboration de la vitamine B12.

Partie 2 : Matériel et méthodes

Chapitre 3 : Caractérisation du milieu et dispositif expérimental

Pour conduire cette étude, une caractérisation des facteurs physiques et biologiques du milieu s'est avérée nécessaire et un dispositif expérimental en blocs de Fischer a été mis en place aussi bien à Kodek qu'à Zouana.

3.1 Caractérisation biophysique de Kodek et Zouana

La localité de Kodek, située dans le Département du Diamaré, est limitrophe aux localités de Kongola, Biriouo, Ouro Massama, Ouro Sambada, Gayak et Djarengol Kodek (Figure 12). La localité de Zouana est située dans le Département du Mayo-Kani et est limitrophe aux localités de Makébi, Lara, Matonri et Djamboutou (Figure 13).

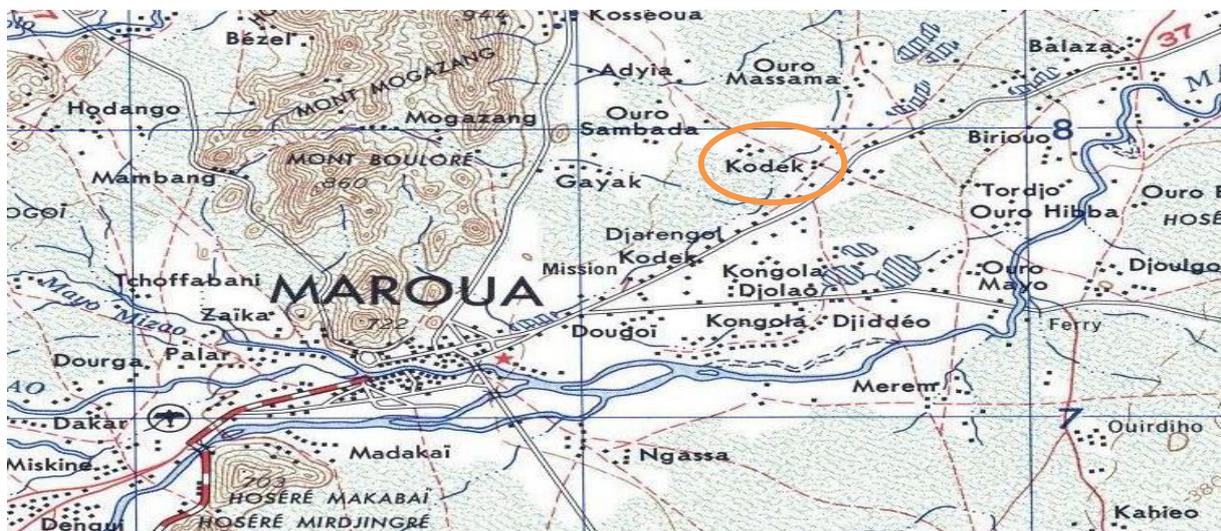


Figure 12 : Carte topographique de Kodek et environs (US Army, 1963)

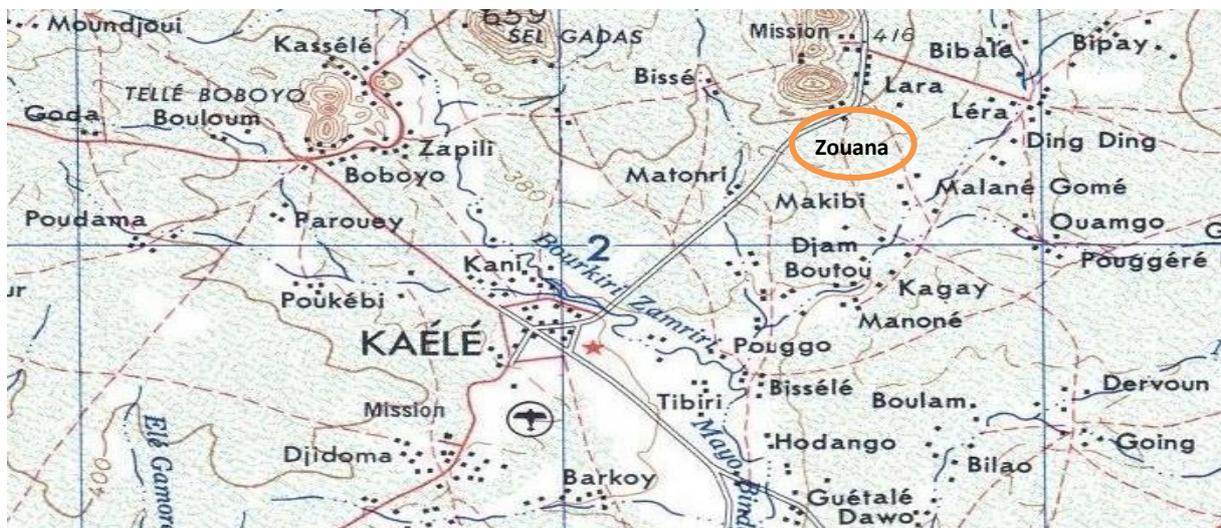


Figure 13 : Carte topographique de Zouana et environs (US Army, 1963)

Le relief de Kodek et Zouana est une pénéplaine à pente faible (moins de 1%). Les vertisols topomorphes caractérisent le site de Kodek et le type d'argile est la montmorillonite (Muller, 1979). Ces sols sont décrits comme des sols peu évolués d'apport alluvial par Raunet (2003). 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. La structure de ces sols est bien développée (polyédrique anguleuse à sur-structure prismatique). Le taux de matière organique (0 – 20 cm) est inférieur à 2 %. Le pH est de l'ordre de 6 – 6,5 en surface et en profondeur. La capacité d'échange est de 15 à 20 méq % (méq/100g de sol), avec le calcium comme élément largement dominant. Ces sols qui abritent la station IRAD de Kodek, sont globalement d'excellente qualité physique et physico-chimique et sont parmi les meilleurs observés dans la zone de Maroua (Raunet, 2003), bien que la baisse de leur fertilité depuis lors soit perceptible à travers la baisse des rendements.

Le site de Zouana quant à lui est situé à 8 km au Nord-Est de Kaélé, chef-lieu du département du Mayo Kani. La montagne de Lara est située à 1 km au Nord du site. L'exploitation agricole de la zone de Zouana mais aussi de Kodek s'est intensifiée avec l'avènement en 1950 de la culture cotonnière, encadrée par la Compagnie Française pour le Développement des Textiles (CFDT), nationalisée le 10 Mai 1974 en Société de Développement du Coton du Cameroun (SODECOTON). Ce qui a fait plus de soixante ans d'exploitation plus ou moins continue de ces sols et beaucoup de parcelles sont donc abandonnées parce qu'elles sont rendues improductives. 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 (Durmont et Personne, 1966, *in* Mekem, 2013). Les vertisols à phase érodée

très fréquente (Brabant et Gavaud, 1984) caractérisent le type de sols de Zouana, tandis que Raunet (2003) les qualifie de sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes, ce qui peut être aussi assimilé aux sols gravillonnaires. Les sols ferrugineux tropicaux hydromorphes sont des sols ferrugineux lessivés avec une accumulation importante d'argile en profondeur, formant un horizon imperméable et engorgé, d'où l'hydromorphie. En effet, lorsqu'une nappe d'eau perchée, temporaire ou permanente, affecte les couches les plus superficielles d'un sol, les conditions asphyxiques qui règnent dans les horizons du sol le font évoluer vers un sol hydromorphe.

Les sols hydromorphes sont caractérisés, d'une part, par le fer qui est réduit en milieu asphyxique (couleur verte du fer ferreux) et oxydé en milieu aéré (couleur rouille du fer ferrique) et, d'autre part, par la faible vitesse de décomposition et d'humification de la matière organique qui va donc s'accumuler. Ils résultent de l'engorgement permanent des horizons profonds les rendant asphyxiques et réducteurs ; l'horizon supérieur est un horizon mixte organique et minéral, où les humus, selon les conditions, sont des hydromulls à engorgement fugace, des hydromoders à engorgement saisonnier et court, des hydromors (avec une nappe battante) ou des anmoors. Le mull étant de l'humus formé en aérobiose avec une présence importante de la pédofaune notamment des lombrics et des macroarthropodes (diplopodes et cloportes) mais aussi de la pédoflore ; tandis que le moder diffère du mull par la présence assez rare des lombrics. L'anmoor est un type d'humus qui se forme en anaérobiose non permanente ; il faut pour cela que la nappe phréatique subisse des variations saisonnières importantes. À la différence de la tourbe, l'anmoor est constitué par un mélange intime d'argile et de molécules organiques généralement bien humifiées ; le taux de celles-ci n'excédant pas 30 %. De couleur noir, l'anmoor présente une structure compacte, plastique, collante et son épaisseur est de l'ordre de 20 à 30 cm. On distingue un anmoor acide (oligotrophe) et calcique (beaucoup plus riche et biologiquement plus actif). L'horizon profond est un gley ou un pseudogley et se caractérise par ses conditions asphyxiques et réductrices où le fer à l'état divalent (ferreux) lui confère une couleur verdâtre. Dans la zone de battance de la nappe phréatique qui l'ennoie, on peut observer des zones où le fer, parce qu'il a été au contact de l'oxygène, est sous sa forme trivalente (ferrique) et de couleur rouille.

La répartition, dans le profil du sol de ces plaques de fer ferrique, sont une bonne indication sur l'amplitude de variation en hauteur de la nappe d'eau.

Pour caractériser le milieu naturel dans les sites de référence de l'étude (Kodek et Zouana), il a été tout d'abord question de faire une identification des espèces végétales arborées, arbustives et herbacées les plus dominantes. Un relevé floristique a donc été conduit au site et autour de chaque site pour les arbres et arbustes tandis que pour les herbacées, ce relevé a été effectué sur les parcelles du bloc expérimental en jachère en première année (non exploitées en *Crotalaria juncea*). Pour une identification précise des essences, les livres « *Arbres, arbustes et lianes des zones d'Afrique de l'Ouest* » d'Arbonnier (2002) et « *Adventrop, les adventices d'Afrique soudano-sahélienne* » de Le Bourgeois et Merlier (1995), ont été mis à contribution. Des cartographies thématiques ont été également exploitées pour la caractérisation des sites. Le pluviomètre Breveté SGD N° 1269277, à lecture directe d'une capacité de 150 mm et installé dans chaque site a permis de collecter les différentes précipitations enregistrées. Pour ce qui est des sols, il s'est agi de déterminer la granulométrie (% terre fine) et les effets réels d'amélioration des propriétés physico-chimiques des parcelles à *Crotalaria juncea* par rapport à celles dites témoins (N total, C organique, CEC, pH-H₂O, pH-KCl, ...); ce qui correspond à la classification qualitative et quantitative des caractéristiques des sols. Des observations ont donc été faites sur le profil pédologique notamment le profil cultural des 2 sites pour analyser les horizons de surfaces touchés par les travaux culturaux. Et aussi, l'activité biologique notamment des vers de terres et des termites y a été appréciée en début de la 2^{ème} campagne culturale sur 0-5 cm, à travers une échelle d'abondance dominance faite sur placettes de 1 m² délimitées au milieu des parcelles :

+++ : Très dominant ; ++ : Dominant ; + : Très faible.

Par ailleurs, pour déterminer les effets réels d'amélioration des propriétés physico-chimiques des sols à *Crotalaria juncea* par rapport aux sols témoins, un échantillon de sol a été prélevé sur 20 cm avec la tarière au milieu de chaque parcelle, ceci pour éviter l'effet de proximité des autres parcelles. Mais avant, 4 échantillons ont été prélevés par site puis mélangés pour constituer des sols de référence, en début de la première saison d'expérimentation (juin 2015). En fin de saison ou de campagne agricole 1 (octobre

2015), des échantillons ont été à nouveau prélevés pour estimer le bilan nutritionnel des sols exploités en crotalaire et ceux laissés en jachère d'une campagne. Ensuite, des prélèvements d'échantillons de sols ont été opérés en début de la deuxième saison agricole (juin 2016) pour évaluer l'amélioration ou non de la teneur en matière organique et en éléments minéraux pendant l'intercampagne ou saison sèche, sous l'action des organismes telluriques des parcelles à crotalaire comparées aux parcelles témoins, laissées en jachère en campagne 1. Au total dix échantillons de sol dont 5 par site (Tableau 6), ont été soumis après homogénéisation et conditionnement en paquets de 200 g, à l'analyse au Laboratoire d'analyse des sols et de chimie de l'environnement (LABASCE) de la Faculté d'agronomie et des sciences agricoles (FASA) de l'Université de Dschang.

Tableau 6 : Eléments de prélèvement des sols à Kodek et Zouana

Sol de référence (début saison 1)	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2	Sol à <i>Crotalaria</i> <i>juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria</i> <i>juncea</i> en début saison 2
--------------------------------------	---	---	---	---

Le premier niveau de granulométrie (terre fine et éléments grossiers) a été déterminé par l'utilisation d'un tamis de 2 mm de diamètre donnant la proportion en pourcent de la masse de la terre fine par rapport à celle des éléments grossiers (à taille supérieure à 2 mm). La granulométrie de la terre fine (sable, limon, argile) a été aussi évaluée au laboratoire. D'autres propriétés physiques, chimiques et physico-chimiques des sols ont été par ailleurs déterminées, donc la capacité d'échange cationique (CEC), la somme des bases échangeables, le taux de saturation, la teneur en C organique, le N total, le rapport C/N, le pH-H₂O et le pH-KCl. La méthode de détermination de la CEC est celle approuvée par la Société canadienne de science du sol (SCSS, 2000), avec une solution de CaCl₂. Les bases échangeables extraites (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) ont été ensuite déterminées par la spectrométrie d'absorption atomique (AA) après extraction avec la méthode Mehlich III. En effet, la CEC, exprimée en méq/100 g et souvent représentée par (T), est aussi la quantité totale de charge négative par 100 g de sol.

Un équivalent (éq) = masse molaire / valence de l'ion (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ ou K⁺).
Donc, 1 méq de Ca /100 g de sol est égal 40 / 2, soit 20 mg de Ca / 100g.

Les ions métalliques Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ occupent la majeure partie du complexe absorbant et la quantité de ces ions par 100 g de sol est appelée Somme des bases échangeables (S). La différence ($T - S$) représente la quantité d'ions (Al^{3+} , H^+ , Mn^{2+} , Fe^{2+}) qui s'ajoutent à S pour constituer la CEC. Et le taux de saturation (V en %) est donc : $V = S/T \times 100$

Les métaux extractibles notamment l'acidité aluminique ont été évalués par la méthode par spectrométrie d'émission au plasma. Le phosphore assimilable a été déterminé par la méthode colorimétrique après extraction avec la méthode Mehlich III. L'azote a été évalué par la méthode de titrimétrie. La détermination de la matière organique a été faite à travers le dosage du carbone organique des sols par la méthode Walkley-Black modifiée.

Le pH des sols a été mesuré au laboratoire sur des suspensions de sol dans l'eau, avec une proportion en poids égal à 1/2,5 ; par la potentiométrie (pH-mètre à électrodes) bien que les méthodes de titrimétrie (par titrage) ou de colorimétrie (utilisation de papier pH) soient aussi possibles (Giasson et Jaouich, 2008). Deux électrodes combinées sont introduites dans la suspension : une électrode de pH traditionnelle et une électrode de référence. La première est située dans la cavité interne tandis que la deuxième est située au niveau de la cavité supérieure. L'électrode de référence est remplie d'une solution de KCl 4M saturée avec du AgCl. Lorsque les électrodes sont plongées dans les suspensions du sol, l'électrode de pH engendre par rapport à l'électrode de référence une différence de potentiel en fonction de l'activité de l'ion hydrogène en solution.

En effet, les électrodes de pH mesurent l'activité de l'ion en solution plutôt que la concentration de cet ion. L'activité d'un ion en solution est une mesure de sa réactivité et dans les solutions diluées, l'activité de l'ion est à peu près égale à sa concentration. Il arrive souvent que l'activité soit proportionnelle à la concentration et ceci permet de calibrer l'appareil pour mesurer en unités de concentration. La relation entre l'activité des ions et le potentiel de l'électrode est logarithmique. L'équation de Nernst explique cette relation thermodynamique :

$$E = E_0 + [2,3 (RT/nF)] \log A$$

E = le potentiel total mesuré du système

E₀ = la fraction du potentiel dans des conditions standard

R = la constante des gaz

T = la température absolue

n = le nombre d'électrons impliqués

F = la constante de Faraday

A = les activités des ions (formes oxydées et réduites) = (a_{ox} / a_{red}).

Lorsque le niveau de l'activité ionique s'intensifie, le potentiel de l'électrode augmente positivement dans le cas des cations et négativement dans le cas des anions. L'électrode traditionnelle de pH réagit à l'activité des ions d'hydronium (H₃O⁺) qui se forment comme suit : H₂O + H⁺ = H₃O⁺

L'équation de Nernst peut donc être utilisée :

$$E = E_0 + [2,3 (RT / nF)] \log (a \text{ H}_3\text{O}^+ / a \text{ H}_2\text{O})$$

Comme les mesures sont habituellement faite à des températures de 25°C environ, l'équation de Nernst peut se réécrire sous cette forme :

$$E = E_0 + 0,059 \log (a \text{ H}_3\text{O}^+ / a \text{ H}_2\text{O})$$

Dans les solutions aqueuses, à H₂O constante, le potentiel peut être directement relié à logH₃O⁺. Toutefois, les activités d'H₃O⁺ sont habituellement moindres qu'une unité et leurs logarithmes sont donc négatifs. Ces logarithmes négatifs représentent le pH.

$$E = E_0 - 0,059 \text{ pH}$$

La valeur d'E₀ est en effet fonction de plusieurs facteurs dont le mode de traitement durant la fabrication de l'électrode. Pour toutes ces raisons, E₀ ne peut être calculé avec précision et la relation entre E et le pH doit être déterminé par calibration par rapport à une solution de pH standard (Giasson et Jaouich, 2008).

3.2 Dispositif expérimental de l'étude

Deux sites de référence ont été choisis pour l'étude sur la crotalaire à savoir Kodek et Zouana (Figure 14), respectivement dans les départements du Diamaré et du Mayo-Kani, Région de l'Extrême-Nord du Cameroun. La distance à vol d'oiseau entre les deux sites est de 56,70 km ; mesurée au *Global Positionning System* (GPS), de marque Garmin etrex 30.

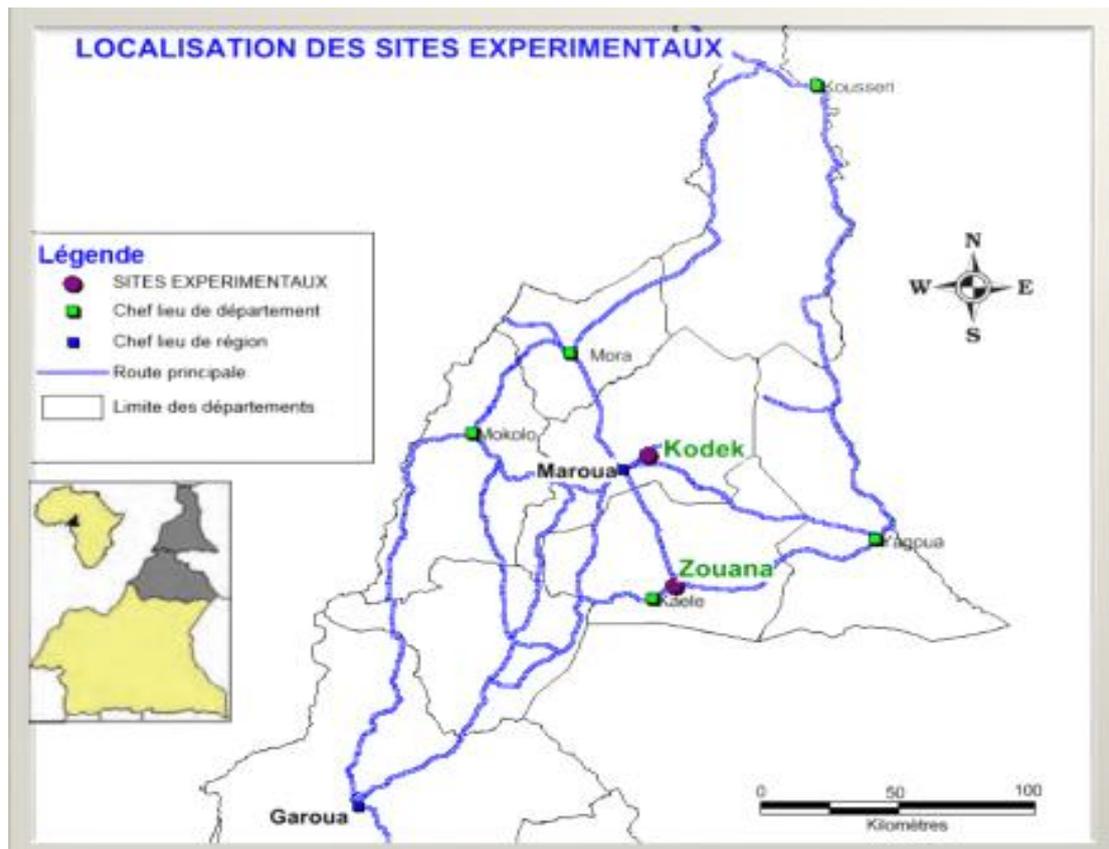


Figure 14 : Localisation des sites de Kodek et de Zouana

Dans chaque site, un dispositif expérimental factoriel a été mis en place en l'occurrence un bloc randomisé (de Fischer) à 7 traitements et à 4 répétitions, présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Dispositif expérimental mis en place

CM	C	N3	N2	N0	N4	N1
N4	N3	N0	CM	N1	C	N2
N0	N2	C	N1	N4	CM	N3
C	CM	N1	N4	N2	N3	N0

Les parcelles (4 m x 4 m soit 16 m² 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 *Crotalaria juncea*

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.

Seuls les traitements C ont été conduits en 1^{ère} année avec la mise en place de la crotalaire, les autres parcelles étant restées en jachère et n'ont été exploitées en maïs qu'en 2^{ème} année aussi bien que les modalités C. Chaque dispositif a été donc conduit sur 448 m² avec la date de semis et la densité de semis bien précises. Le piquetage des parcelles avec des gabarits de bois et un pentadécamètre a précédé l'exploitation du dispositif.

3.3 Matériel végétal et phytotechnie

La crotalaire, le *Brachiaria*, le maïs et le coton sont les ressources végétales utilisées dans cette étude tandis que l'urée est l'engrais minéral azoté appliqué dans les essais.

3.3.1 *Crotalaria juncea* (Linné)

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*. Sa mise en culture a été effectuée avec des semences saines en provenance du site de multiplication de la SODECOTON à Pitoa (Figure 15)



Figure 15 : Semences de *Crotalaria juncea*

De nombreux pays comme le Cameroun, ont intégré la crotalaire dans certains systèmes de cultures : en association avec des céréales dont le maïs (Figure 16) ou le sorgho, en pur ou en association avec d'autres plantes de couverture (*Brachiaria ruziziensis*, *Eleusine coracana*), en rotation avec le coton, le soja, ou le niébé. En effet, en association, elle présente plusieurs intérêts : augmenter la production de biomasse pour les cultures suivantes, exploitées sur biomasse, améliorer le niveau de fertilité des sols par le recyclage des éléments minéraux et la fixation d'azote et contribuer au contrôle des mauvaises herbes par effet d'ombrage et d'allélopathie sur *Striga* par exemple. Par ailleurs, sa croissance rapide la fait recommander comme plante à installation précoce et elle peut être fauchée comme engrais vert avant la mise en place de la culture pluviale proprement dite.



Figure 16 : Association *Crotalaria*-maïs en cours de cycle à Zouana

3.3.2 *Brachiaria ruziziensis* (Germain et Evrard)

L'espèce *Brachiaria ruziziensis* est une espèce végétale herbacée et annuelle, de la famille des Poacées. C'est une graminée semi-érigée à rampante qui se développe en touffes de 1 m à 1,5 m à la floraison. Ses graines sont ellipsoïdales et mesurent 2 mm de long et celles semées proviennent du site de Pitoa (Figure 17). Son système racinaire est fasciculé et composé de nombreuses racines, denses et capables de se développer jusqu'à 1,8 m de profondeur. Bien que de plus en plus exploitée pour la gestion de la fertilité des sols, cette plante très appréciée par le bétail est bien aussi cultivée comme fourrage. Elle est en effet introduite dans les SCV, à cause de son potentiel de production de biomasse très élevé. Dans de bonnes conditions, la production de biomasse aérienne peut atteindre 25 t/ha (Mvondo Awono *et al.*, 2012). Cette bioressource se multiplie par graines et est répandue dans toute l'Afrique Centrale. Les racines de cette plante, étant suffisamment profondes (1 m et plus) ramènent en surface les éléments nutritifs des profondeurs que certaines plantes cultivées sont incapables de prélever. Ces racines contribuent aussi à décompacter les sols et à augmenter leur porosité.



Figure 17 : Semences de *Brachiaria ruziziensis*

3.3.3 Maïs et culture

Du nom scientifique (*Zea mays* L.), 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

racines identifiées et regroupées en 14 complexes raciaux (CIRAD-GRET, 2002). 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 P₂O₅ et 60 kg de K₂O (CIRAD-GRET, 2002). Ainsi, pour produire 5 tonnes/ha, les quantités d'éléments minéraux prélevés au sol sont estimées dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Quantités de minéraux (kg) pour produire 5000 kg/ha de maïs (CIRAD-GRET, 2002)

Elément	Azote (N)	Acide phosphorique (P ₂ O ₅)	Potasse (K ₂ O)	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 et est cédé entre 150 et 250 F CFA/kg suivant la période de vente et la loi de l'offre et de la demande. 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 (Beernaert et Bitondo, 1993). 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% (Beernaert et Bitondo, 1993). Un sol de structure particulière, de texture argilo-limoneuse est à préférer pour sa culture. Les mauvaises herbes avant le semis sont contrôlées par un labour chimique au glyphosate GLYCOT ULTRA 757 WG, avec une concentration de 680g/kg de produit dont l'effet de dessiccation est très probant (Figure

18). C'est un herbicide systémique non sélectif à granulés dispersables dans l'eau, utilisé en post-levée contre de nombreuses espèces d'adventices, généralement bien développées. Son effet sur la pédofaune de cette zone reste tout de même à savoir.



Figure 18 : Flore herbacée à droite contrôlée par le glyphosate

En zone cotonnière du Nord-Cameroun, le maïs représente en moyenne 0,74 ha sur 3,24 ha dans l'assolement d'une exploitation agricole, soit 22,84%, contre 38% de coton, 17% de mil ou sorgho sp, 15% d'arachide et 7% de Mouskwaari ou sorgho ss. Il est ainsi cultivé par 66% des 1900 exploitations échantillonnées, contre 93% en coton, 76% en arachide, 67% en mil, 33% en niébé, 22% de Mouskwaari, 5% en oignon et 3% en igname. Et le rendement moyen obtenu en maïs est de 2181 kg/ha (Adoum *et al.*, 2007). Cette céréale 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...) 3% (Adoum *et al.*, 2006a).

La variété de maïs utilisée est CMS 9015 (Figure 19), produite la campagne agricole précédente par la section Céréales du Centre de l'IRAD de Maroua. Cette variété est résistante à la maladie virale dite *streak* ou striure, plus productive que CMS 8501 et CMS 8704 et mieux adaptée aux conditions édaphiques et climatiques de la zone soudano-sahélienne. Elle est en outre tolérante au *Striga hermonthica*. C'est une variété à cycle de production court, soit 90 jours, avec un potentiel de production de 5 tonnes/ha.

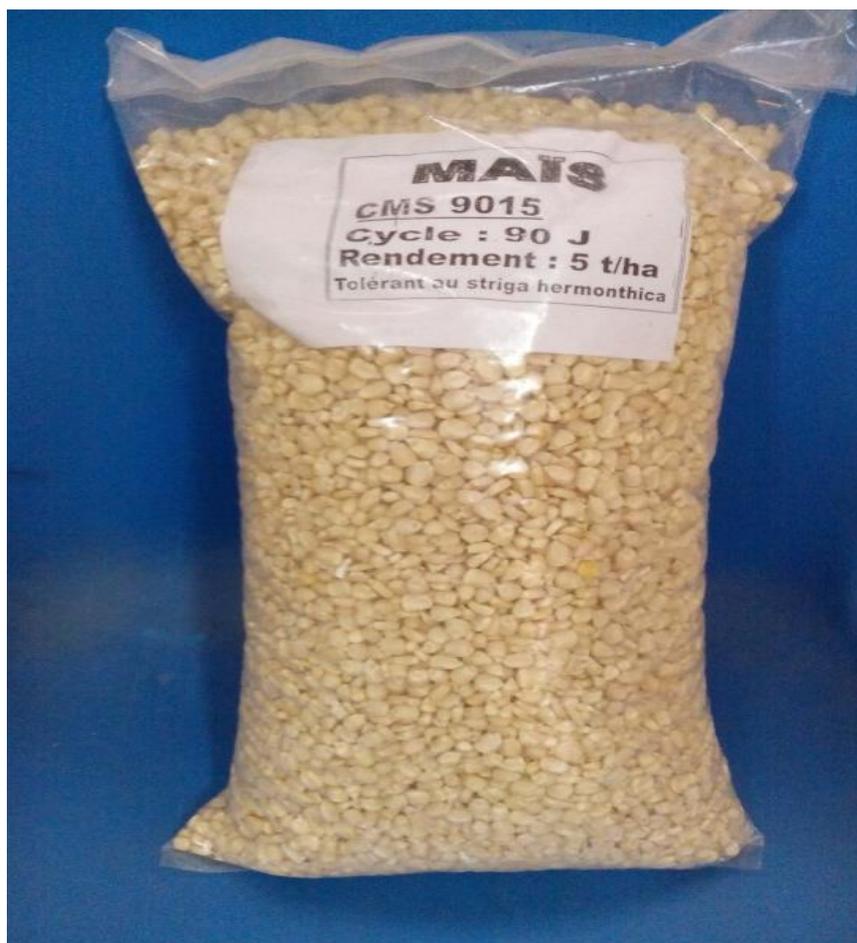


Figure 19 : Semences du maïs utilisé (CMS 9015)

3.3.4 Coton et culture

Pour ressortir les résultats sur coton en milieu paysan, des essais villageois multilocaux ont été conduits en SCV et en témoins labourés. Dix secteurs cotonniers et 5 producteurs/secteur ont ainsi fait l'objet d'analyse. Chaque producteur choisi a produit du coton pendant une saison culturale à la fois sur parcelle SCV (2500 m²) et sur parcelle conventionnelle (2500 m²) et les deux parcelles sont à priori contiguës. Seules les parcelles de coton semées à la même date ont été retenues et suivies. En SCV, le coton a été semé sur la biomasse sèche de *Brachiaria ruziziensis*, installé un an avant en monoculture. Cette plante de couverture a donc été fauchée en fin de campagne agricole pour constituer la paille de couverture du sol. Pour le coton conventionnel, le précédent cultural est le sorgho pluvial en pur.

En effet, le coton est la principale culture commerciale au Nord-Cameroun à l'image du cacao et du café au Sud du pays. Le cotonnier est une plante arbustive textile, de la famille des Malvacées, tribu des Hibiceae. L'espèce *Gossypium hirsutum* cultivée au Cameroun, tétraploïde ($2n = 52$) provenant de l'Amérique Latine, assure 90% de la production mondiale en coton tandis que *Gossypium barbadense* d'origine péruvienne, en assure moins de 5%, tout comme les deux espèces diploïdes ($2n = 26$) *Gossypium arboreum* et *Gossypium herbaceum*, d'origine asiatique. Le coton sert à l'industrie textile, de tapissage, de cordage et en pharmacie, elle est utilisée pour de l'ouate hydrophile et de compresse (CIRAD-GRET, 2002). Les graines sont utilisées pour la fabrication d'huile de table, de tourteau, les coques peuvent servir de combustibles, d'aliments du bétail et d'engrais organiques (Hinimbio, 2003). Le tourteau de coton issu des variétés dépourvues de gossypol (glandless) peut être transformé en farines, concentrats ou isolats de protéines pour l'alimentation humaine. La protéine des graines de coton pourrait être également utilisée dans la fabrication de films biodégradables : emballages, plastisemis, peaux artificielles (CIRAD-GRET, 2002).

La culture du coton a été le principal moteur du développement du monde rural du Nord-Cameroun au cours de ces cinquante dernières années, avec accès à l'économie monétaire, à la professionnalisation des producteurs du coton, à la modernisation des systèmes de culture tant cotonnier que vivrier pour améliorer la sécurité alimentaire ainsi que la création d'emplois et services : commerce, transport, banque, ... (Levrat, 2010). La culture du coton a également joué un rôle important dans l'aménagement du territoire avec notamment la délimitation et le bornage des parcelles de culture et l'organisation avec l'administration des migrations des populations de l'Extrême-Nord, à forte pression démographique vers le Nord, moins peuplé, avec des terres encore vierges.

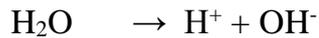
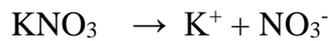
Le cultivar de *Gossypium hirsutum* utilisé sous forme des semences délintées est IRMA L484 et produit par la section génétique, relevant de la convention de recherche entre le CIRAD, l'IRAD et la SODECOTON. Contrairement aux semences vêtues dont le besoin est de 40 kg/ha, 15 kg/ha de graines délintées suffisent pour le semis (Figure 20). Aussi, les semences délintées présentent une levée rapide par rapport à celles vêtues du fait de leur humidification rapide.



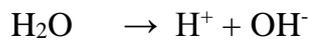
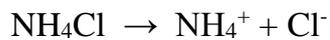
Figure 20 : Semences de coton vêtues (à gauche) et délintées (à droite)

3.4 Urée et application

L'urée ($\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2$), de dosage 46%N, est un engrais simple et le seul élément majeur primaire apporté au sol est l'azote, à la différence des engrais composés, qui sont soit binaires avec deux éléments majeurs (N-P, N-K ou P-K), soit ternaires avec trois éléments majeurs (N-P-K). Evans (1998) note que l'augmentation importante des rendements a été rendue possible dans la dernière moitié du 20^{ème} siècle, par l'utilisation de l'azote, produit industriellement depuis les années 1940. L'urée est l'un des engrais azotés qui ont le plus fort dosage en azote. Il est sous forme uréique et est l'engrais le plus utilisé en zones tropicales, surtout au Cameroun du fait de son prix avantageux et son dosage élevé. Il peut être aussi appliqué sur pratiquement tous les types de sols. La forme la plus commercialisée est la forme perlurée, avec des perles de 1 à 2 mm de diamètre. L'urée est un engrais de base pour les engrais composés de mélange. Dans les sols à température et pH élevés, il y a risque de volatilisation d'azote de l'urée sous forme d'ammoniac (NH_3). L'urée dans le sol s'hydrolyse en Diammonium carbonate ou en ammonium carbamate qui sont des produits essentiellement fugaces et donnent aussitôt les carbonates d'ammonium, de l'ammoniac et de l'acide carbonique. Par contre, l'apport d'engrais nitriques (NO_3^-) s'accompagne d'une alcalinisation ou augmentation du pH du sol, tandis que l'emploi d'engrais ammoniacaux (NH_4^+) comme l'urée s'accompagne d'une acidification ou baisse du pH du sol :



$\text{K}^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{KOH}$ (libération et formation de la base KOH et il y a alcalinisation)



$\text{Cl}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{HCl}$ (libération et formation de l'acide HCl et il y a acidification).

Toutefois, selon les types de sols, la variation du pH ne suit pas l'apport d'une quantité d'éléments acides ou basiques en raison du pouvoir tampon du sol (ou propriété à résister à la variation de pH), et l'effet du pouvoir tampon est justifié par la présence du complexe argilo-humique (avec d'importantes charges négatives) qui fixe une partie des ions apportés notamment les cations. La dose d'azote apportée à un sol dépend de la teneur de ce sol en azote et des besoins azotés de la plante cultivée. Toutefois, pour préserver la fertilité d'un sol notamment en azote, il est recommandé de lui faire un apport total des quantités de nutriments (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Zn, etc.) dont la plante a besoin pour son développement.

Chapitre 4 : Fixation symbiotique de l'azote et production agricole

Les nodosités efficaces ont permis d'évaluer la fixation symbiotique de l'azote et les paramètres de production agricole ont été également déterminés en l'occurrence la densité, la taille, la biomasse et les rendements.

4.1 Détermination du potentiel de fixation d'azote par la crotalaire

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 crotalaire 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 où le développement végétatif est au summum, 5 plants de crotalaire 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 atmosphérique. Ce comptage a été fait à travers une minutieuse observation et la prise en compte de la présence ou non dans les nodosités transversalement découpées du pigment rose, la leghémoglobine, indispensable à cette fixation symbiotique. Ainsi, les nodosités roses à leghémoglobine sont dites efficaces (Figure 21) les nodosités blanches sont dites inefficaces (Figure 22) à cette fixation. Les plants déracinés sont laissés sur les parcelles pour constituer la biomasse.



Figure 21 : Nodosité efficace de *Crotalaria juncea* à Kodek



Figure 22 : Nodosité inefficace de *Crotalaria juncea* à Kodek

4.2 Evaluation de la production de la crotalaire, du maïs et du coton

4.2.1 Evaluation des paramètres cultureux de la crotalaire

Avant d'arriver à l'évaluation de la densité, de la taille des plants et les quantités de biomasses (aérienne et racinaire) produites en première saison culturale, le défrichage et le semis ont été faits comme opérations préalables. Le semis de la crotalaire en monoculture s'est fait en poquets de 2 cm de profondeur, à raison de 3 graines par poquet, espacé de 25 cm sur les lignes et 40 cm entre les lignes. Le démariage à 2 plants a été opéré à 21 JAS, pour garder une densité de 200000 plants/ha. Un essai de production optimale de biomasse de crotalaire, avec effet de croisement de densité et de taille de plants aurait toutefois permis d'identifier la meilleure densité de plants à adopter. Le calcul des densités des plants a été fait sur la base du comptage de ces plants sur chaque ligne de 4 m.

Pour déterminer la taille des plants en fin du cycle (90 JAS), 10 plants de crotalaire/parcelle ont été mesurés au hasard à l'aide d'un pentadécamètre ; soit au total 40 plants par site. De même à 90 JAS, 5 plants au hasard par parcelle de crotalaire ont été arrachés pour la détermination de la phytomasse, à travers la séparation de la partie aérienne de la partie racinaire, au niveau du collet de chaque plant à l'aide d'une machette. Ensuite, ces parties ont été pesées pour déterminer les quantités de biomasses (aérienne et souterraine) annuellement produites à partir du poids moyen d'un plant. La partie aérienne des plants a été morcelée à 25 cm de long pour faciliter le conditionnement et la pesée. Après la pesée de la biomasse humide, une deuxième pesée

est intervenue 60 jours plus tard, pour évaluer la biomasse sèche avec une dessiccation effectuée à l'air libre sous toit. La balance électronique MEDIFIELD, *Equipment et Scientific LTD*, de précision plus ou moins 2 g a été utilisée pour ces différentes pesées au laboratoire de l'IRAD de Maroua. Après la pesée des parties racinaire et aérienne humide puis sèche des plants, la masse moyenne d'un plant a été déterminée à Kodek et à Zouana. Connaissant le nombre de plants de crotalaire par parcelle, on a procédé à la détermination de la biomasse par parcelle en multipliant le poids moyen d'un plant par le nombre total des plants. La teneur en eau évaporée (en %) a été obtenue du ratio de la différence entre la masse humide et la masse sèche sur la masse sèche.

4.2.2 Production et évaluation des rendements du maïs

Un itinéraire technique de production du maïs a été adopté ; ce qui a permis à terme d'évaluer et comparer les rendements (*output*) en SCV et sur les différents niveaux de fertilisation en N (*input*) sur les deux sites expérimentaux. Ce qui réfère donc à la classification quantitative de l'aptitude des sols, ou la réponse du sol aux teneurs en azote du sol et aux différents niveaux de fertilisation azotée. Cette production de maïs a été conduite de façon méthodique en deuxième année culturale sur le dispositif expérimental randomisé de Fischer à 7 traitements et à 4 répétitions, soit 28 parcelles élémentaires par site.

La préparation du terrain a consisté simplement à un défrichage préalable notamment de quelques pieds isolés d'arbustes. Un semis direct du maïs a été effectué sur un sol non labouré, d'une part sur la biomasse de crotalaire (Figure 23) 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.



Figure 23 : Biomasse de *Crotalaria juncea* sur le sol de Zouana

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 enfouies à 3 cm de profondeur, mais le démariage a été fait à un plant/poquet, soit une densité de 50000 plants/ha. Cette densité a été conservée sur toutes les parcelles, ayant procédé à un remplacement systématique des plants crevés à 20 et à 40 JAS (ce qui était d'ailleurs très négligeable, soit 0 à 3 plants par parcelle de 16 m², représentant ainsi 0 à 3 plants sur 160 plants). Une parcelle contiguë au dispositif semée à la même date et n'ayant pas eu d'apport d'engrais a servi à ce prélèvement complémentaire. Le semis en maïs s'est passé le 27 juin 2016 à Kodek et le 28 juin 2016 à Zouana. La crotalaire 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, donc 80 cm entre les lignes de crotalaire 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, avec à 21 JAS un démariage de 2 plants/poquet, soit une densité de 100000 plants/ha de crotalaire, associés à 50000 plants/ha de maïs. Pour le semis du maïs, la variété CMS 9015, en provenance de l'IRAD a été utilisée. Ces semences certifiées étaient donc bien mûres et saines, sans trace de charbon, non abîmées, non ridées et non pourries. Elles ont été traitées avec un produit à poudre mouillable de double formulation : 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.

Sous forme des cristaux incolores, et de formule $C_9H_{10}ClN_5O_2$ ou 1-[(6-chloro-3-pyridinyl)-méthyl]-4, 5-dihydro-N-nitro-1-H-imidazole, l'imidaclopride est un insecticide appartenant à la famille chimique des dérivés des chloronicotiniles, à DL 50 égale à 450 mg/kg. Elle est issue de la recherche Nitokuno, qui est une filiale japonaise de Bayer AG. Soluble dans l'eau (0,5 g/l) à 20°C, cet insecticide agit par contact et par ingestion et est doté des propriétés systémiques. Il est actif au niveau du système nerveux des insectes en prenant la place du neurotransmetteur (acétylcholine) dans le récepteur post-synaptique. Il présente un large spectre d'efficacité sur les piqueurs-suceurs (pucerons, cicadelles, ...), les coléoptères, quelques diptères et lépidoptères. Sa teneur maximale en résidus dans le maïs est de 0,1 mg/kg. Le thirame, quant à lui, lutte contre la fonte des semis du maïs. Sa formule est $C_6H_{12}N_2S_4$ ou disulfure de bis (diméthylthiocarbamoylé). C'est un fongicide d'origine américaine de la famille chimique des dithiocarbamates, encore appelé TMTD. Il a un effet d'inhibition sur un grand nombre de champignons, avec une rémanence de l'ordre de 3 semaines. Sa solubilité dans l'eau est de 30 mg/l (ACTA, 1996). Le glyphosate GLYCOT ULTRA 757 WG, fourni par la firme AFCOTT, a été utilisé en post-semis le jour même du semis pour contrôler les adventices sur les parcelles, ceci à la dose de 1040 g/ha, diluée dans 5 litres d'eau. L'appareil Handy à 5 piles, avec une capacité de 5 litres, 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. L'urée ainsi utilisée, de nom commercial MACRO FERTIL, est distribuée à l'endroit des producteurs de la Confédération Nationale des Producteurs de coton du Cameroun (CNPC-C) par l'entreprise *Louis Dreyfus Commodities*, basée à Douala. Les quantités d'azote et d'urée appliquées sur les parcelles de 16 m² ont été calculées et pesées sur la balance électronique MEDIFIELD et consignées dans le Tableau 9. 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. Pour le cas précis de la fertilisation de la parcelle N1, avec une dose de 80 kg/ha de N, la quantité (g) de N au 16 m² de la parcelle est de $(16 \times 80 \times 1000) / 10000$, soit 128 g et la quantité subséquente d'urée sera donc de $(128 \times 100) / 46$, soit 278,26 g.

Tableau 9 : Quantité d'urée appliquée (g/16 m²)

R 1	CM QN = 0 QU = 0	C QN = 0 QU = 0	N3 QN = 384 QU = 835	N2 QN = 256 QU = 557	N0 QN = 0 QU = 0	N4 QN = 512 QU = 1113	N1 QN = 128 QU = 278
R 2	N4 QN = 512 QU = 1113	N3 QN = 384 QU = 835	N0 QN = 0 QU = 0	CM QN = 0 QU = 0	N1 QN = 128 QU = 278	C QN = 0 QU = 0	N2 QN = 256 QU = 557
R 3	N0 QN = 0 QU = 0	N2 QN = 256 QU = 557	C QN = 0 QU = 0	N1 QN = 128 QU = 278	N4 QN = 512 QU = 113	CM QN = 0 QU = 0	N3 QN = 384 QU = 835
R 4	C QN = 0 QU = 0	CM QN = 0 QU = 0	N1 QN = 128 QU = 278	N4 QN = 512 QU = 1113	N2 QN = 256 QU = 557	N3 QN = 384 QU = 835	N0 QN = 0 QU = 0

R1, R2, R3, R4 correspondant aux 4 répétitions du dispositif

QN : Quantité d'azote appliquée QU : Quantité d'urée appliquée

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 aurait permis d'augmenter le coefficient réel d'utilisation de l'azote. Sur le blé d'hiver par exemple, 3 apports (avec un dernier apport courant montaison, début épiaison) ont favorisé l'amélioration du taux de protéines (UNIFA, 2005). 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 maximiser 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 sacs en polypropylène après avoir enlevés la spathe, grande bractée membraneuse enveloppant l'épi. Après 2 semaines de séchage à l'air libre sous toit, les épis récoltés et despathés sur 4mx2 de chaque parcelle, ont été égrenés à la main, puis pesés à la balance MEDIFIELD, pour déterminer les différents rendements.

4.2.3 Production et évaluation des rendements du coton

Sur sol bien drainé avec un précédent cultural non coton, le semis a été effectué sur labour pour le système conventionnel et avec usage de l'herbicide total Glyphosate sur *mulch*. La variété utilisée IRMA L484, est semée le 10 juin, avec 15 kg/ha de semences délintées. Ces semences délintées ont été traitées au carbamate Carbosulfan et semées en ligne, avec des écartements de 80 cm entre les lignes et 25 cm entre les poquets, soit une densité de 100 000 plants/ha, le démariage étant à 2 plants par poquet. Au semis qui s'est fait sur sol humide, 3 graines délintées par poquet ont été enfouies. L'engrais complet NPKSB (22-10-15-6-1) a été appliqué à 30 JAS à la dose de 200 kg/ha, avec un complément de 4 kg/ha de sulfate de zinc, aussi bien sur témoin qu'en SCV en raison des besoins du cotonnier en ces éléments pour une meilleure production. Trois sarclages mécaniques ou manuels ont été effectués sur les témoins. Pour le coton en SCV, un désherbage manuel a été opéré lorsque la biomasse n'a pas réussi à maîtriser l'enherbement et au besoin, un sarclage chimique au glyphosate est fait entre les lignes à l'aide d'un pulvérisateur à cache (Appareil Saga 35). Le buttage au corps butteur a été effectué à 40 jours après la levée pour les parcelles labourées. Les traitements insecticides ont été mis en place dès l'apparition des boutons floraux, selon la méthode de lutte prédéfinie (LPD) qui se fait tous les 14 jours. Les principaux ravageurs du cotonnier ainsi contrôlés sont les chenilles phyllophages (*Syllepte derogata*, *Anomis flava*, *Spodoptera littoralis*, *Polyphago tarsonemus*, *Cosmophyla sp*) ; les chenilles carpophages (*Helicoverpa armigera* ou *Heliothis armigera*, *Diparopsis watersi*, *Earias insulana*) ; les piqueurs-suceurs et aleurodes (*Aphis gossypii*, *Bemisia tabaci*, qui produisent du miellat avec effet de dépréciation de la qualité de fibre du coton) ; et les acariens, les altises et les criquets, qui attaquent les jeunes cotonniers et affectent les rendements. La récolte a été effectuée entre le 1^{er} et le 14 novembre, période où les capsules ayant convenablement floconné. A l'aide du peson GLOBE, Spring-Dial Hoist Scale de 5 g de précision et de 200 kg de capacité pondérale, tout le coton graine récolté sur chaque parcelle de 2500 m² a été pesé *in situ*.

4.2.4 Détermination de la valeur de remplacement en fertilisant azoté

La pesée de la biomasse de crotalaire a été effectuée en deux phases dont la pesée de la biomasse humide ou aquifère et la pesée de la biomasse sèche 60 jours après la première pesée au moment où la teneur en eau a été suffisamment faible ; le séchage de la biomasse ayant été effectué à l'air libre, sous l'ombre. Après la dernière pesée, les différents échantillons de crotalaire ont été restitués aux parcelles respectives où le prélèvement a été mené. Le nombre d'épis de maïs ayant été évalué 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. Après la production du maïs sur les différents systèmes, il a aussi été question d'évaluer la valeur de remplacement en fertilisant azoté de l'espèce *Crotalaria juncea*. La courbe de réponse du sol à la teneur en azote ou courbe de rendements a permis de déterminer l'apport d'azote dans le sol à travers les exsudats racinaires en lien avec l'association maïs-crotalaire d'une part et d'autre part la valeur d'azote issue de la minéralisation du *mulch* de la crotalaire.

4.3 Analyse et traitement des données

Le logiciel XLSTAT, version 2016.07.39066 a été utilisé pour l'analyse des données de la densité, de la taille et de la biomasse des plants de la crotalaire. L'intervalle de confiance observé est de 95%, soit un seuil de signification de 5%, avec une tolérance de 0.0001. L'écart-type, valeur de la racine carrée de la variance, ou erreur relative de la moyenne traduisant l'effet d'homogénéité des modalités, a aussi été déterminé. La corrélation entre la biomasse totale produite et la densité des plants de crotalaire a été déterminée par le logiciel Microsoft Excel, version 2013 ; à travers l'insertion du nuage des points avec des courbes lissées ; et avec détermination du coefficient R^2 , à travers l'option courbe de tendance. Le test de Duncan a été utilisé pour l'analyse statistique des paramètres culturaux de la crotalaire et du maïs ; 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 du maïs ont été capturées et traitées sur le logiciel Snagit 12 Editor,

version TechSmith du 16 Décembre 2016. Pour ce qui est du coton en milieu paysan, les données des rendements pesées au peson GLOBE ont été saisies sur le tableur Excel (2013) et analysées sur les logiciels de traitement des données statistiques Modalisa (2014) et Statistical Analysis System (2010).

Pour l'analyse économique des agrosystèmes, un compte d'exploitation simplifié a été élaboré sur la base des consommations intermédiaires, des opérations culturales et des revenus générés. Les valeurs ajoutées nettes ont été calculées pour assurer une comparaison économique des agrosystèmes. Le matériel agricole de labour, de sarclage et de buttage n'étant pas recommandé en SCV, tous les systèmes ont été homogénéisés sans matériel donc sans amortissement, ayant tenu compte simplement de la rémunération des prestations de service. Les coûts des intrants utilisés dans cette analyse sont ceux pratiqués en zone cotonnière du Nord-Cameroun et les valeurs retenues des opérations relèvent des pratiques paysannes dans la même zone. Le coût de l'urée pour le maïs tient compte du coût de l'unité fertilisante (UF) d'azote et est calculé sur la base de l'urée 46% dont le sac de 50 kg coûte 20000 F, soit 869,56 F/UF d'azote. Le prix de vente du maïs retenu est celui pratiqué pendant la période de récolte ou prix bord champ, soit 100 F/kg.

Partie 3 : Résultats et discussion

Chapitre 5 : Caractéristiques biophysiques des sites

A l'issue de la caractérisation du milieu biophysique, des résultats sur la flore arborée et herbacée, la pluviométrie et les caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols ont été obtenus.

5.1 Milieu biophysique de Kodek et de Zouana

Le site expérimental de Kodek est situé à 10,20 km à vol d'oiseau au Nord-Est de Maroua. Ses géoréférences sont : 10°39.130'N (latitude Nord), 14°25.556'E (longitude Est), 433 m H (altitude). Cette zone est exploitée depuis plus de 60 ans pour des productions agropastorales. Le paysage est une savane herbeuse et arbustive, avec à certains endroits d'importants pieds d'épineux. Le relevé floristique du site et autour du site montre que dans cette zone, les espèces arborées et arbustives dominantes sont entre autres *Tamarix nilotica*, *Terminalia albida*, *Terminalia baumannii*, *Terminalia mantaly*, *Trema orientalis*, *Acacia arabica*, *Acacia fasciculata*, *Acacia flava*, *Ziziphus jujuba*, *Ziziphus mucronata*, *Ziziphus abyssinica*, *Prosopis africana*, *Balanites aegyptiaca*, *Ficus abutilifolia*, *Sterculia laurifolia*, *Combretum altum*, *Vernonia amygdalina*, *Vernonia senegalensis* et *Agave sisalana*. Certaines espèces ici rencontrées ont une utilisation agroforestière et jalonnent les parcelles agricoles, il s'agit de : *Faidherbia albida* à dominance nette, *Acacia Senegal*, *Acacia nilotica*, *Balanites aegyptiaca*, *Monrigha oleifera*, *Tephrosia vogelii*, *Vitellaria paradoxa*, *Adansonia digitata*, *Khaya senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*, *Tamarindus indica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Cajanus cajan* et *Sesbania sesban*. On peut aussi observer à certains endroits la présence lâche d'*Azadirachta indica*, de *Cassia seamea*, d'*Eucalyptus camaldulensis* et des palmiers dont *Borassus flabellifer*, *Hyphaene thebaica* et *Phoenix dactylifera*, avec des fruits très appréciés et dont l'apport de la litière sur les sols est non négligeable. On retrouve par ailleurs dans certaines exploitations des espèces fruitières notamment le manguier (*Mangifera indica*), le goyavier (*Psidium goyava*), les agrumes dont le citronnier (*Citrus limon*), l'oranger (*Citrus sinensis*), le pamplemoussier (*Citrus grandis*). L'adhésion à l'agroforesterie a été encouragée par le projet PCS-ESA, lequel en 2011, a réalisé 6100 ha de plantations agroforestières dans la zone cotonnière du Nord-Cameroun (Hinimbio, 2016).

Parmi les herbacées présentes, il est observé une dominance nette des Graminées : *Andropogon gayanus*, *Andropogon schirensis*, *Beckeropsis unista*, *Brachiaria brizantha*, *Brachiaria jubata*, *ctenium newtoni*, *Cymbopogon gigantus*, *Digitaria ciliaris*, *Digitaria diagonalis*, *Hypparrhenia filipendula*, *Loudetia simplex*, *Panicum baumanii*, *Panicum laetum*, *Pennisetum subangustum*, *Setaria fusca*, *Sporobullus pectinellus*. On retrouve aussi des Cypéracées comme *Fimbristylis pilosa*, *Mariscus ternifolius*, *Pycnus mortonii*, *Scleria bullifera*, *Scleria atchenii*, des Comméliacées comme *Commelina benghalensis* et *Murdania simplex*.

Le climat de Kodek est de type soudanien, avec une saison des pluies assez courte (avril à octobre) à précipitations variant de 650 à 1100 mm, soit une moyenne de 857 mm de 2005 à 2016. Ce qui est au-dessus de la pluviosité moyenne annuelle indiquée par Donfack et al. (1993), soit 650 à 750 mm dans la plaine du Diamaré. Les précipitations de Kodek de 2005 à 2016 et par décade de 2014 à 2016 relevées par le pluviomètre Breveté SGD N° 1269277, sont représentées dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10 : Pluviométrie (mm) de Kodek de 2005 à 2016

Mois	2005 (mm)	2006 (mm)	2007 (mm)	2008 (mm)	2009 (mm)	2010 (mm)	2011 (mm)	2012 (mm)	2013 (mm)	2014 (mm)	2015 (mm)	2016 (mm)	Moyenne
Avril	47	18	34	2	36	5	3	8	0	12	0	0	14
Mai	121	29	56	44	27	32	104	44	46	52	26	52	53
Juin	128	128	121	83	141	109	86	55	142	161	130	63	112
Juillet	179	204	282	168	207	205	186	207	227	223	175	163	202
Août	377	214	220	278	329	187	213	331	389	278	146	212	265
Sept.	97	119	226	120	136	267	180	163	172	142	175	221	168
Oct.	100	64	15	22	125	65	25	25	23	23	27	03	43
Total	1049	776	954	717	1001	870	797	833	999	891	679	714	857

Tableau 11 : Pluviométrie (mm) de Kodek par décade en 2014, 2015 et 2016

Mois	Avril			Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre			Octobre			Total
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
2014	8	2	23	37	56	8	29	49	28	27	65	83	153	46	49	125	16	37	20	30	0	891
2015	0	0	0	5	5	18	44	25	61	22	76	77	37	6	101	67	80	28	14	0	13	679
2016	0	0	0	01	21	30	0	13	50	37	76	50	54	45	113	67	124	30	0	3	0	714
Moyenne	3	1	8	14	27	19	24	29	46	29	72	70	81	32	88	86	73	32	11	11	4	761

Le site de Zouana a 7 ha de superficie regroupée en blocs d'essais (Figure 24) et a été mis en expérimentation en 2002 par le projet ESA. Ses références géographiques sont : 10°08.935' N (latitude Nord), 14°30.285' E (longitude Est), 383 m H (altitude).



Figure 24 : Site expérimental de Zouana

Le paysage de Zouana est une savane herbeuse et arbustive, avec des pieds plus ou moins isolés d'essences forestières et agroforestières, qui rappellent pratiquement celles rencontrées sur le site de Kodek, avec toutefois une présence très lâche des épineux notamment *Faidherbia albida*. Après une observation floristique des strates herbacée et arbustive à Zouana, on se rend compte que ce sont les mêmes essences végétales qu'on retrouve sur le site de Kodek, avec toujours une dominance nette des Graminées.

Le climat de Zouana est de type soudanien, à saison des pluies qui va d'avril à octobre, avec une pluviométrie qui varie de 700 à 1300 mm (Tableaux 12 et 13), soit une moyenne de 951 mm de 2005 à 2016.

Tableau 12 : Pluviométrie de Zouana de 2005 à 2016

Mois	2005 (mm)	2006 (mm)	2007 (mm)	2008 (mm)	2009 (mm)	2010 (mm)	2011 (mm)	2012 (mm)	2013 (mm)	2014 (mm)	2015 (mm)	2016 (mm)	Moyen ne
Avril	0	0	53	23	11	15	17	19	0	58	0	12	17
Mai	87	147	67	174		32	59	65	97	101	88	90	92
Juin	133	157	125	163	147	148	92	159	81	106	101	139	129
Juillet	284	164	175	115	227	266	184	275	143	179	119	192	194
Août	219	397	329	555	226	282	272	220	293	248	199	329	297
Sept.	02	356	179	203	162	108	202	240	179	178	184	143	178
Oct.	23	31	0	32	104	130	64	65	30	50	54	29	51
Total	748	1252	928	1265	877	981	890	1043	823	920	745	934	951

Tableau 13 : Pluviométrie (mm) de Zouana par décade en 2014, 2015 et 2016

Mois	Avril			Mai			Juin			Juillet			Août			Septembre			Octobre			Total
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
Décade	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
2014	8	2	23	37	56	38	34	49	28	27	69	83	153	36	49	125	16	37	20	30	0	920
2015	0	0	10	13	0	85	21	24	56	23	25	51	12	49	138	88	90	6	22	22	10	745
2016	4	8	0	7	34	49	26	50	63	33	54	105	107	95	127	75	44	24	28	1	0	934
Moyenne	4	3	11	19	30	57	27	41	49	28	49	80	91	60	105	96	50	22	23	18	3	866

La pluviométrie sus-évoquée épousent assez bien les isohyètes élaborées par Raunet (2003) aussi bien à Kodek qu'à Zouana (Figure 25). Les sites de Kodek et de Zouana ont donc des caractéristiques biophysiques qui correspondent vraisemblablement aux écosystèmes les plus sensibles et les plus exposés à la dégradation : ces sites constituent de ce fait des zones à écologie fragile.

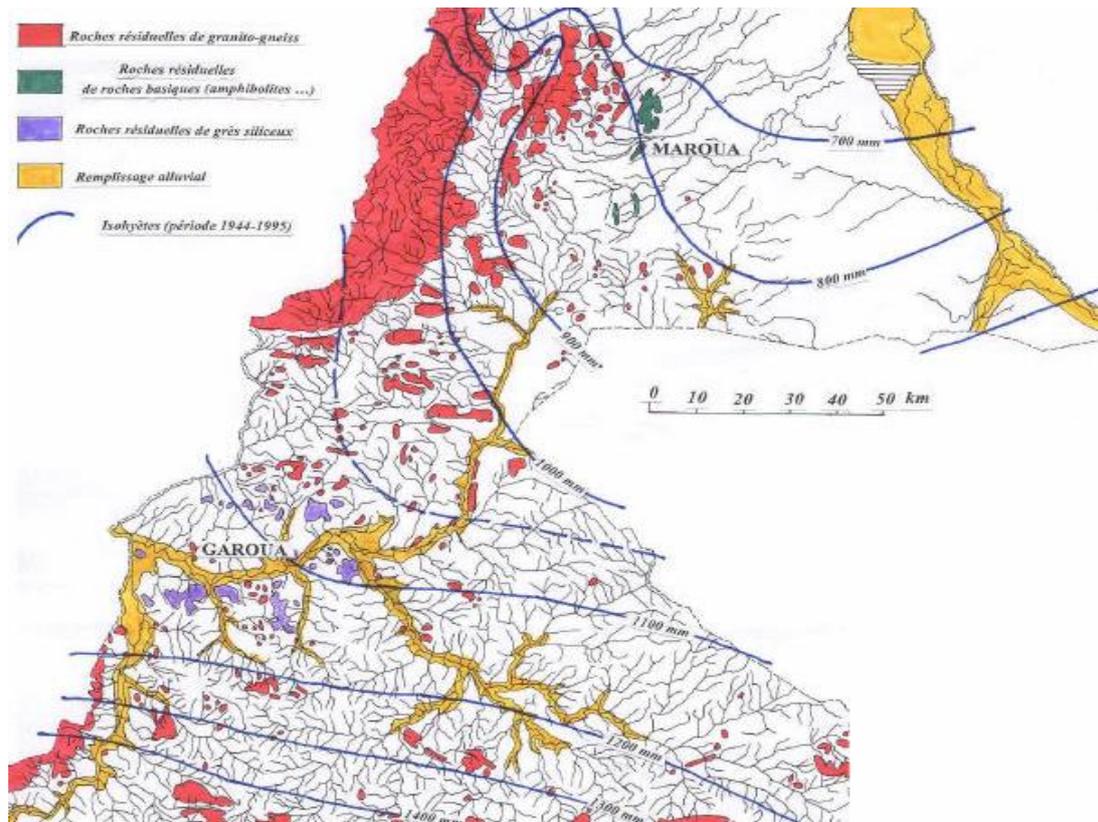


Figure 25 : Réseau hydrographique et isohyètes au Nord-Cameroun (Raunet, 2003)

5.2 Caractéristiques des sols à Zouana et à Kodek

5.2.1 Profil culturel

Pour le profil culturel, la couleur sombre de l'horizon O et un début d'assombrissement de l'horizon A sur le sol en SCV ont été observés à Kodek et à Zouana (Figure 26) et illustrent bien la formation de l'humus après décomposition de la litière de Crotalaire.



Figure 26 : Profil culturel sur sol témoin à Zouana

L'horizon B par contre, reste le même dans les deux systèmes, ce qui signifie qu'en profondeur, la teneur en matière organique du sol varie peu selon qu'on soit en SCV ou en témoin, surtout à moins de deux ans d'exploitation en SCV. En effet, la nature ne peut produire que quelques centimètres de couche de terre arable en 100 ans, mais avec les fumiers verts ou les cultures de couverture on peut avoir 1 cm de couche de terre arable tous les 3 ou 4 ans (AGRIDAPE, 2015). En effet, l'humus, forme stable de la matière organique, subit une minéralisation lente. Leclerc (1995) estime son taux de minéralisation ou coefficient K_2 autour de 1% en zone tempérée et 3% en zone tropicale par an. Ce taux de 3% en zone tropicale rentre dans l'intervalle de 2 à 5% indiqué par N'Dayegamiye (2007), qui estime également que les sols peuvent minéraliser 60 à 400 kg/ha/an d'azote selon leurs précédents culturaux. Ce faible taux de minéralisation justifie l'effet de durabilité du SCV, la litière se minéralisant pendant plusieurs années. L'humus a par ailleurs une grande capacité de rétention en eau, il peut ainsi retenir jusqu'à 100 fois son poids en eau et donc pallier au stress hydrique souvent observé dans cette zone où la pluviométrie est globalement faible. En général pour assurer la décompaction des sols dégradés, la production de biomasse de l'espèce *Brachiaria ruziziensis* est souvent utilisée comme tête de rotation, avec apport des fumures organique et minérale vulgarisées. Le *Brachiaria* peut être de ce fait associé en alternance aux légumineuses *Crotalaria retusa* ou *Crotalaria juncea* : c'est le mélange restaurateur (Figure 27) où une phytomasse abondante est aussi produite pour reconstituer l'horizon O. Ce qui contribue aussi à rendre perméables les sols.



Figure 27 : Mélange restaurateur *Brachiaria-Crotalaria* à 90 JAS à Zouana

5.2.2 Activité biologique du sol

Les observations faites pendant la conduite de l'étude sur les sites de Kodek et de Zouana montrent que l'activité biologique est beaucoup plus importante et dominante sur les sols en SCV de par le nombre plus important d'organismes vivants comme les lombrics ou les vers de terres (Figure 28) et les termites (Figure 29), que sur des sols en système conventionnel. Sur les deux sites, l'échelle de dominance est donc très nette pour ces organismes telluriques, qui sont très abondants dans les SCV et très faibles sur les témoins. En effet, les vers de terre sont parmi les plus célèbres habitants du sol ; l'IRD (2005) les nomme « stars du sol » et Crovetto (2000) les situe avec les racines des plantes et les arthropodes comme les meilleurs cultivateurs naturels du sol. Avec environ 10000 espèces estimées dans le monde dont 150 en France, ils représentent la première biomasse animale terrestre : une tonne/ha en moyenne, et près de quatre fois plus dans une prairie normande, soit une densité de 1 à 4 millions d'individus/ha, l'équivalent de 3 vache/ha. Cette intensité de l'activité biologique est par ailleurs notée par Bikay (2005) à Zouana, qui identifie comme macrofaune, 35 groupes appartenant à 22 ordres, 8 classes et 3 phyla, avec une dominance nette des insectes et des vers de terre. Il relève aussi en matière de richesse taxonomique que les sols couverts de graminées abritent 27 groupes, ceux couverts de légumineuses en abritent 29, les sols labourés 18 et les sols nus 20. Ce qui signifie que l'amélioration de la teneur en matière organique du sol par les SCV favorise le développement de la pédofaune ; laquelle participe et favorise la décomposition et la minéralisation de ladite matière organique pour rendre les éléments nutritifs facilement mobilisables par les plantes. Des résultats similaires ont été rapportés par Randrianjafizanaka (2010) à Madagascar. Ce qui s'accommode bien avec la théorie de l'inadaptation des méthodes agricoles, où il convient de mettre fin à l'hérésie des pratiques classiques comme le labour et l'usage excessif des produits agropharmaceutiques. Ceci, afin de relancer les mécanismes biologiques du sol, en le rééquilibrant et en lui redonnant de quoi créer son humus sous forme d'un apport organique. À terme, il faut encourager l'agriculture biologique, la rotation culturale et redonner aux arbres leur importance dans le paysage agraire à travers l'agroforesterie.



Figure 28 : Ver de terre sur sol SCV à Zouana



Figure 29 : Activité des termites sur mulch de crotalaire à Zouana

De même, des conclusions similaires sont ressorties des essais conduits en France par l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) en 2000, après analyses biologiques de deux traitements : labour et travail superficiel sur les différentes couches de sol (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm). Les résultats des mesures de biomasse microbienne mettent en évidence un gradient très net dans le traitement "travail superficiel" : la quantité de microbes vivants est presque deux fois plus élevée dans la couche 0-10 cm que dans la couche 20-30 cm. Dans le traitement "labour" en revanche, les micro-organismes sont répartis de façon beaucoup plus homogène dans le profil étudié. Lorsque, en tenant compte des densités apparentes, on calcule le stock total de microbes vivants, on s'aperçoit qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les 2 traitements. Le stock de carbone "vivant" dans les 30 premiers centimètres du sol est de 2223 kg/ha pour le traitement labour contre 2079 kg/ha pour le traitement travail superficiel. Les différences de biomasse microbienne dues à l'hétérogénéité

naturelle de la parcelle sont en effet plus grandes que les éventuels effets des traitements. Les résultats agronomiques et économiques obtenus sur les essais sus-évoqués apportent des éléments de réponse intéressants et qui peuvent orienter les choix des agriculteurs. Mais les résultats des déterminations biologiques n'apparaissent pas déterminants. En tout état de cause, une activité biologique en tant que telle n'est pas forcément un élément suffisant pour fonder un choix d'itinéraire technique. Il convient au contraire d'apprécier de façon plus globale le fonctionnement du sol en termes de gestion de la matière organique et des conséquences sur les éléments fertilisants (azote, phosphore, cations), la perméabilité, les résidus de produits phytosanitaires, etc.

En effet, l'activité biologique est le moteur de la formation des horizons pédologiques. Les êtres vivants, végétaux et animaux, creusent les galeries, donc fabriquent la porosité. Ils lient les particules entre elles, donc fabriquent les agrégats et des traits pédologiques. Ils dissolvent les minéraux et provoquent la formation des nouveaux minéraux : calcite, hydroxydes, argiles diversifiées (CIRAD-GRET, 2002). En plus de lombrics et des termites, les autres agents qui participent à l'activité biologique des sols sont les bactéries, les champignons, les nématodes, les taupes, les renards, les crabes, les fourmis, etc. Les vers de terre dont le nombre varie de 100 à 500 individus/m², ont en général 20 à 30 cm de longueur et 0,2 à 0,5 cm de diamètre. Ils contribuent à l'incorporation de la matière organique en profondeur du sol, à la formation d'agrégats stables et à l'amélioration de l'infiltration de l'eau et de l'aération du sol par leurs galeries (Citeau *et al.*, 2008). Ces processus biologiques remplacent naturellement et efficacement le labour et partant la charrue (Crovetto, 2000). Leur activité est maximale en saison pluvieuse et cesse en saison sèche, car les rares vers de terre qui survivent, s'enroulent dans une cellule d'estivation. Ils rejettent en surface une couche plus ou moins continue, d'épaisseur variable de terre brune ou grise à gris clair. Brabant (1991a) nomme cette couche la couche biologique Ov, O étant la couche organique à la surface du sol et v l'initiale du terme vermique. Contrairement aux vers de terre, les termites ont une activité permanente.

Certaines pratiques agricoles peuvent perturber considérablement cette vie souterraine et par là même la minéralisation de l'humus. Les labours profonds et des interventions

mécaniques répétées sur le sol éliminent les plus gros organismes édaphiques tandis que cette aération induit une minéralisation de l'humus supérieure à sa capacité de formation. Des sols laissés nus en hiver, après les moissons, n'offrent plus de protection. Par ailleurs, l'emploi de certains produits phytosanitaires ou l'épandage des lisiers, des fumiers ou des boues de stations d'épuration peut modifier l'équilibre de la faune du sol. N'échappant pas à la loi du plus fort, certaines espèces disparaissent ainsi au profit d'autres, plus robustes, introduites avec les apports. Avec la disparition de l'humus et la perturbation de la vie du sol, la stabilité des sols diminue, et ceux-ci deviennent plus sensibles aux tassements, compactations et inondations (Guinot, 2007).

5.2.3 Structure des sols

L'observation minutieuse des différents sols montrent une amélioration de la structure du sol sur les parcelles en SCV comparées aux témoins à Kodek et à Zouana. Le sol qui était bien compacté au départ se retrouve décompacté. Il est ainsi fragmenté en profondeur, avec une bonne porosité et des galeries visibles du fait simultané des organismes du sol et des activités des racines (labour biologique). Par rapport à la porosité, Brabant (1995a) a évalué à Ndock au Nord-Cameroun, la porosité totale à 42%, la macroporosité à 24% et la microporosité 24%. La perméabilité y est assez élevée et atteint une valeur maximale durant la phase d'humectation du sol d'avril à juillet. L'infiltration de l'eau se trouve parallèlement améliorée, les semelles de labour par exemple ayant été rompues par l'activité de la pédofaune et le labour biologique des racines des bioressources. Boli (1996) indique d'ailleurs que l'infiltration d'une lame de 10 cm d'eau se fait en 7 min sur sol SCV et en 1h 30 min sur labour, soit 12,85 fois plus rapide (Figure 30).

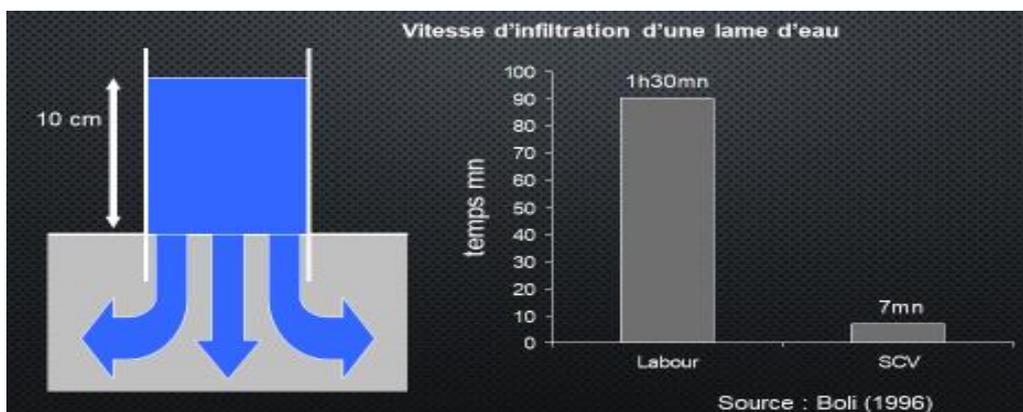


Figure 30 : Vitesse d'infiltration d'eau sur labour et sur SCV (Boli, 1996)

A la différence du sol témoin, l'érosion pluviale est contrôlée sur sol en SCV aussi bien par l'amortissement de l'agressivité ou la battance des pluies sur le sol que par la facilité d'infiltration, avec effet de limitation de ruissellement. Steiner (1996) observe également ces différences dues à la présence de matière organique, ciment des particules, qui empêche les intempéries de dégrader ou d'emporter la couche superficielle du sol. Ce que rapporte aussi Boli (1996) sur les pertes des terres dues à l'érosion à Mbissiri au Nord-Cameroun : 2 t/ha/an en SCV ; 7,2 t/ha/an sur bandes enherbées et 26,3 t/ha/an sur labour. En effet, le labour et le semis direct sur sol nu participent à la dégradation de la structure du sol. Le SCV par contre limite cette dégradation en minorant les interventions mécaniques sur le sol, lesquelles désorganisent la structure du sol (Ndaodeme, 2012). À la différence des témoins, il n'y a donc plus de rigoles et de ravins sur les parcelles SCV. De même, l'érosion éolienne est maîtrisée par la haie vive arbustive constituée d'épineux (*Acacia senegal*, *Acacia nilotica*) installée autour du site de Zouana et qui, en outre a un effet de brise-vent et de protection contre les animaux dévastateurs des cultures. Le SCV confère donc une stabilité structurale au sol. Un point important concerne les relations entre le devenir des résidus de récolte (ou autres matières organiques apportées) et la structure du sol. En effet, la matière organique, à travers ses transformations biologiques améliore la résistance des agrégats aux agressions par l'eau. Au cas où une amélioration de la stabilité structurale est recherchée, pour lutter contre l'érosion, on aura sans doute intérêt à concentrer la matière organique dans les premiers centimètres du sol. Mais il faut avoir conscience que ce faisant, on favorise l'accumulation des éléments nutritifs dans l'horizon le plus superficiel, qui est aussi le plus exposé au stress hydrique et thermique et n'est pas forcément bien prospecté par des racines profondes des cultures.

5.2.4 Texture des sols

En matière de granulométrie, la terre fine (à diamètre inférieure à 2 mm) obtenue des sols de référence, représente 87,10% à Kodek et 57,97% à Zouana (Tableau 14). Ce qui indique que la proportion des éléments grossiers notamment les gravillons, est plus importante à Zouana soit 42,03% du fait de la proximité avec la montagne de Lara contre 12,90% à Kodek. Une proportion d'éléments grossiers supérieure à 30% comme à

Zouana gêne non seulement le travail de préparation du sol, mais aussi le développement normal des racines, surtout lorsqu'il s'agit de produire les racines et les tubercules à forme régulière.

Tableau 14 : Proportions de la terre fine et des éléments grossiers

Site	Terre fine sur 100 g	Eléments grossiers sur 100 g	Terre fine (%)	Eléments grossiers (%)
Kodek	87,10	12,90	87,10 %	12,90 %
Zouana	57,97	42,03	57,97 %	42,03 %

L'observation du Tableau 15 montre qu'à Kodek, sur une profondeur de 20 cm, la teneur du sol en sable varie de 55 à 57% ; celle du limon total de 20 à 31% et celle de l'argile de 14 à 25%. On peut donc dire du sol du site de Kodek qu'il a une texture sablo-limoneuse. Le type d'argile de la zone est la montmorillonite, qui est une argile de néoformation. L'ORSTOM (1962) indiquait d'ailleurs que les teneurs en argile n'atteignaient pas 10% dans cette zone tandis que le sable avait une teneur supérieure à 80%. Brabant (1995a) quant à lui, situe la teneur en argile entre 10 et 15 % dans les forêts claires du Cameroun. La classe texturale sablo-limoneuse de Kodek s'apparente pratiquement à celle du site de Zouana dont la teneur en sable varie de 55 à 61% ; en limon total de 21 à 28% et en argile de 11 à 24% (Tableau 16). La teneur en argile de ces sols est faible en surface à cause du lessivage plus aisé de l'argile vers des horizons plus profonds du profil pédologique, ses particules ayant la plus petite taille. Ce lessivage est favorisé par la faiblesse de formation du complexe absorbant liée à la faible teneur en matière organique du sol. Ces données diffèrent très peu de celles obtenues par Tsozué *et al.* (2015) à Zouana où la proportion de l'argile est globalement faible et varie de 11 à 31% et celle du limon de 19 à 35%. Ce qui traduit aussi que la texture d'un sol est une propriété physique qui varie très peu avec le temps.

Tableau 15 : Fractions granulométriques et classe texturale (%) à 20 cm à Kodek

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2	Moyenne
sable	55	55	57	56	57	56,0
Limon grossier	14	9	10	16	12	12,2
Limon fin	17	11	12	12	14	13,2
Limon total	31	20	22	28	26	25,4
Argile	14	25	21	16	17	18,6
Classe texturale	SL	SA	SL	SL	SL	SL

SA : Texture sablo-argileuse

SL : Texture sablo-limoneuse

Tableau 16 : Fractions granulométriques et classe texturale (%) à 20 cm à Zouana

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2	Moyenne
Sable	56	60	61	57	55	57,8
Limon grossier	9	12	13	9	9	10,4
Limon fin	12	16	15	12	12	13,4
Limon total	21	28	28	21	21	23,8
Argile	23	12	11	22	24	18,4
Classe texturale	SA	SL	SL	SA	SA	SL

5.2.5 pH des sols

Les données de pH-H₂O à Kodek montrent après analyse au laboratoire que ce pH varie de 5,80 à 6,50 ; ce qui indique que les sols sont moyennement ou légèrement acides selon Brady et Weil (2008) dans ce site, mais un peu plus acide à Zouana avec le pH-H₂O qui oscille entre 5,32 et 5,89 (Tableaux 17 et 18). Ce qui cadre pratiquement avec les valeurs trouvées par Brabant (1995a) à Ndock avec un pH H₂O de 5,8 et un pH KCl de 4,4 et celles de Tsozué *et al.* (2015) soit 5,2–5,7 sur sol SCV, 4,9–5,3 sur sol à semis direct et 5,6 sur sol labouré à Zouana. Toutefois, on constate une tendance à l'acidification car l'ORSTOM (1962) indiquait un pH neutre ou légèrement alcalin dans le cordon dunaire du Nord-Est de Maroua. Ces pH neutres ou légèrement acides sont favorables au développement des microorganismes du sol notamment les champignons, les bactéries et actinomycètes qui animent l'activité biologique du sol et participent à la minéralisation de la matière organique. Le fait que le pH-KCl soit inférieur au pH-H₂O démontre que le complexe argilo-humique est essentiellement polarisé en charges négatives, susceptibles de retenir des bases échangeables. Ce qui permet par ailleurs la fixation des cations facilement mobilisables par les cultures et qui auraient été lixiviés ou lessivés en l'absence de ce complexe.

Tableau 17 : Réaction du sol à Kodek

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
pH- H ₂ O	6,08	6,30	5,80	5,80	6,50
pH-KCl	5,01	5,60	5,10	5,04	5,58
pH-H ₂ O–pH-KCl	1,07	0,70	0,70	0,76	0,92

Tableau 18 : Réaction du sol à Zouana

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
pH- H ₂ O	5,32	5,58	5,42	5,40	5,89
pH-KCl	5,01	5,01	4,71	4,68	4,95
pH-H ₂ O-pH-KCl	0,31	0,57	0,71	0,72	0,94

Le pH varie selon la nature du sol et la culture ; au lieu de 0 à 14, il oscille entre 4 à 9 pour les sols agricoles où le niveau de disponibilité des minéraux est tout aussi variable. L'azote par exemple est moins disponible en milieu acide (Figure 31), bien qu'on cherche en règle générale à obtenir une légère acidité (en dessous de la neutralité) qui est alors favorable à l'assimilation.

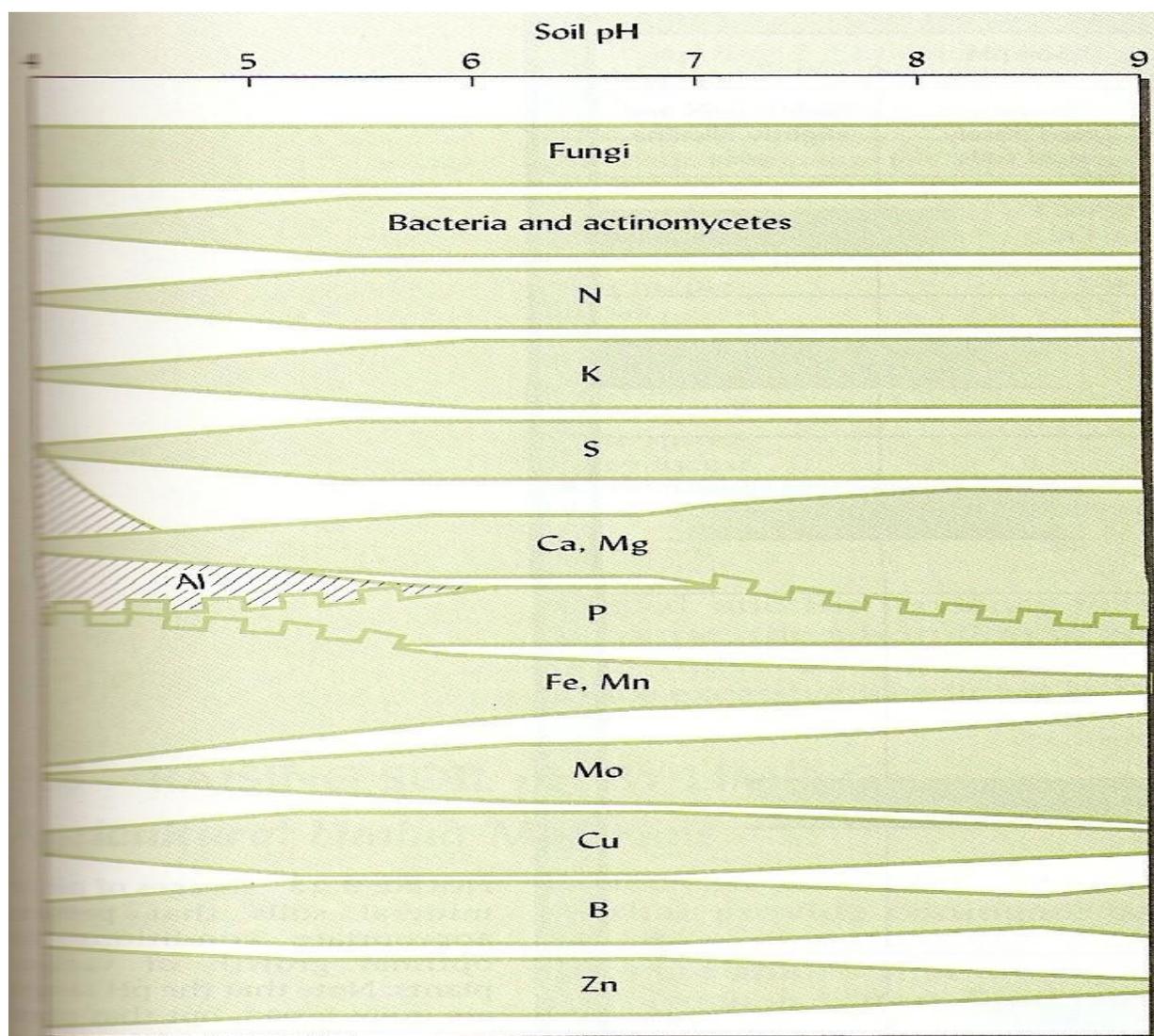


Figure 31 : Disponibilité des éléments nutritifs des plantes selon le pH (Brady et Weil, 2008)

La remontée du pH d'un sol très acide dans lequel la stabilité structurale est assurée par l'aluminium se fait à travers l'aluminium qui disparaît, laissant la place principale à l'hydrogène. En condition acide (surplus de charges négatives), l'absorption des anions devient difficile pour la plante, alors qu'en condition basique, un excès de charges positives dans le sol inhibe l'absorption des cations (Sebillotte, 1993). La stabilité structurale est maximum au-dessous de pH 5,5 (elle est alors assurée par Al^{3+}) et au-dessus de pH 6,5 (elle est alors assurée par Ca^{2+}). Entre 5,5 et 6,5, les dangers d'instabilité structurale sont au maximum (pH mesurés dans de l'eau distillée). Le pH est > 9 suite à l'alcalinisation par le sodium, ceci dès qu'il y a plus de 10 à 15% de Na^+ sur le complexe absorbant, et la stabilité structurale devient très faible (CIRAD-GRET, 2002). La baisse du pH en saison pluvieuse jusqu'à 5,2 et celle du potentiel d'oxydoréduction, induite par la saturation en milieu organique, entraînent une solubilisation du Fe et du Mn. La concentration de ces éléments (1500 mg/kg de Fe ionique) peut ainsi devenir toxique pour les plantes sensibles (Brabant, 1991b). Le pH du sol est aussi influencé par les migrations des éléments. Ainsi, le retrait du complexe absorbant des cations bi ou trivalents, entraîne l'acidification d'un sol neutre, par départ des cations alcalino-terreux remplacés par l'hydrogène.

En effet, le pouvoir tampon d'un sol limite en effet les variations importantes de pH de ce sol. Plus un sol est riche en colloïdes argilo-humiques, plus le nombre d'ions en réserve sur le complexe est élevé et donc plus son pouvoir tampon est important. Il est ainsi plus difficile de corriger le pH d'un sol fortement tamponné de type argileux par rapport à un sol peu tamponné de type sableux (Giasson et Jaouich, 2008). Le calcium est le cation minéral le plus représenté sur le complexe argilo-humique et a un effet sur la variation du pH. Lorsque le sol se décalcifie (prélèvement du couvert, lessivage), le départ d'ions Ca^{2+} du complexe laisse la place à un nombre supplémentaire d'ions H^+ ce qui provoque plus ou moins à long terme une acidification. L'eau récemment distillée contient le même nombre d'ions H^+ et d'ions OH^- , elle est donc neutre et quand une solution de sol contient le même nombre d'ions H^+ et OH^- , elle est également neutre. En ajoutant du $(\text{OH})_2\text{Ca}$ au sol, il y aura plus d'ion OH^- que H^+ ; le sol sera alcalin. Au contraire, par addition de HCl ; le sol contient plus de H^+ que de OH^- , il devient donc acide. La méthode la plus représentative pour démontrer le rapport entre H^+ et OH^- est

celle du pH. En effet, le meilleur pH d'un sol agricole se situe souvent entre 5,5 et 6,5 ; ce qui équivaut à un sol légèrement acide. Ce pH est donc considéré comme celui dans lequel le plus grand nombre de nutriments est avantageusement accessible aux plantes. Le pH est aussi lié aux types de minéraux et de roches mères (Giasson et Jaouich, 2008).

L'effet de suspension souvent observé est un effet expérimental qui fait que le pH d'une suspension de sol mesuré à l'aide des électrodes est plus bas que l'activité des ions H^+ dans la solution interparticulaire. Deux explications sont utilisées : la première est basée sur le potentiel de Donnan et la deuxième est basée sur la perméabilité sélective des membranes. Le potentiel ou l'équilibre de Donnan consiste en une variation de potentiel électrique entre les particules de sol sédimentées et la solution surnageante. En effet, l'équilibre est assuré par une différence non nulle de potentiel membranaire (effet Donnan) du fait des petits ions qui ont traversé la membrane dialysante. Ceci provoque la baisse du pH avec l'augmentation de la concentration du sol ou de l'argile dans la suspension. La perméabilité sélective des membranes s'applique aux couches de sédimentation du sol ou aux suspensions d'argile qui imposent des mobilités ioniques variables aux cations et anions. Ces conditions qui contribuent à faire mesurer des valeurs de pH plus basses que la réalité se présentent dans les suspensions ou les pâtes concentrées, dans les argiles à forte capacité d'échanges, dans les ions échangeables monovalents et dans les solutions interparticulaires diluées (Giasson et Jaouich, 2008).

L'origine de l'acidité du sol s'explique par le fait que certains sols se sont développés sur des matériaux originels acides. Aussi, la pluie lessive-t-elle la chaux en profondeur, entraînant une certaine partie hors de l'atteinte des racines des plantes, ce qui augmente l'acidité du sol. La plupart des porteurs d'azote sont acides et rendent les sols plus acides. Il en est de même pour le soufre, constituant de certains fongicides et son emploi crée des conditions acides. L'acidité du sol provient parfois d'un grand nombre de composés comme les acides organiques, l'aluminium libre, le dioxyde de carbone de l'atmosphère, la fermentation de la matière organique et enfin les ions échangeables du complexe absorbant en particulier le proton H^+ . D'une manière générale, on peut dire que si les facteurs dominants sont la pression de CO_2 ou les ions H^+ du complexe, le pH

est alors compris entre 5 et 6,5. Par contre, si les composés dominants sont les acides organiques et l'aluminium libre, le pH est de 3,5 à 5 (CIRAD-GRET, 2002).

Les précipitations s'acidifient lorsque les polluants comme les bioxydes d'azote et de soufre s'oxydent dans l'atmosphère pour se combiner ensuite avec la vapeur d'eau pour former des acides forts (HNO_3 et H_2SO_4). À l'échelle mondiale, la combustion du pétrole et surtout du charbon constitue la cause principale de l'acidité anormale des pluies. Les phénomènes volcaniques qui sont particulièrement importants dans certaines régions du globe peuvent aussi contribuer à l'acidification des pluies. L'acidification contribue aussi à libérer de leur substrat minéral plusieurs métaux toxiques tels que l'aluminium, le plomb, le calcium, le zinc, le mercure, le cuivre, etc. L'aluminium à forte concentration dans l'eau se coagule dans les branchies des poissons qui meurent asphyxiés. Les autres éléments se concentrent dans la chaîne alimentaire et de cette façon, les sources naturelles de ces substances toxiques seraient multipliées par l'apport solubilisé de l'acidification des précipitations (Giasson et Jaouich, 2008). Il est observé que les sols ont une tendance naturelle à l'acidification.

L'acidité du sol, exprimée par le pH, est régie par la quantité de cations hydrogène (H^+) qui sont fixés sur le complexe argilo-humique (CAH) ou en mouvement dans la solution du sol. Elle influence directement l'assimilabilité des éléments nutritifs par le couvert végétal et joue à ce titre un rôle fondamental dans la rentabilité de la culture. Certaines plantes sont tolérantes à certains pH que d'autres. Les sols ont une tendance naturelle à l'acidification, c'est-à-dire au remplacement sur le complexe des cations minéraux par des ions H^+ . Or ce phénomène est accentué par l'action de certains engrais (phosphate, nitrate, ammoniac). Ainsi pour éviter d'atteindre des niveaux d'acidité trop importants, il convient de corriger régulièrement le pH du sol par des amendements magnésiens ou calciques (chaulage). Par ailleurs, pour l'origine de la basicité du sol, on relève que l'apport excessif de chaux entraîne une élévation du pH. La basicité provient aussi de la composition des sols tels que les sels de carbonate de magnésium et de calcium, qui caractérisent les sols salés et calcaires. Dans les sols salés, le système est sous la dépendance des ions Na^+ et Mg^{2+} qui peuvent donner un pH élevé, supérieur à 9 (Giasson et Jaouich, 2008). Il existe une relation entre le pH et le complexe argilo-humique, doté

de charges négatives susceptibles de retenir les cations sous la forme échangeable c'est-à-dire pouvant être remplacé par d'autres cations. Le pH permet de définir d'une manière approximative l'état du complexe absorbant notamment le taux de saturation. De façon générale, la charge électrique de surface des constituants du sol est largement dépendante du pH du milieu. L'élévation du pH favorise l'apparition de charges négatives et l'abaissement de pH, celle de charge positive. Il y a un pH pour lequel la charge de surface est nulle. Ce pH est appelé point de charge nulle. Alors, le pH a un effet sur la grandeur de la charge de surface du complexe absorbant et sur la répartition entre charge positive et charge négative. Ce qui va favoriser l'adsorption soit des anions soit des cations par les végétaux.

5.2.6 Teneur en matière organique

La teneur en matière organique des différents échantillons de sols varie de 1,38 à 2,09% à Kodek, soit 1,79 à 2,09 pour les sols à crotalaire et 1,38 à 1,59 sur sols à jachère (Tableaux 19). Cette teneur varie de 1,67 à 2,24% à Zouana, soit 1,91 à 2,03 sur sols à crotalaire et 1,67 à 2,24 sur sols à jachère (Tableaux 20). La matière organique (MO) est calculée sur la base du carbone organique (CO), selon la formule :

$$MO = 1,724 \times CO$$

L'augmentation de la teneur en matière organique en intersaison sur les différents échantillons des sols se justifie par l'effet d'humification de la biomasse avec l'action de la pédofaune. Donfack *et al.* (1993) trouvent que le carbone total varie de 0,62 à 1,37 et l'azote total varie quant à lui de 0,05 à 0,11 sur 0-5 cm des sols hardés du Diamaré après quatre années d'expérimentation de réhabilitation. Ces auteurs indiquent en outre que l'amélioration est plus nette en surface (0-5 cm) et bien moins significative entre 5 et 15 cm tout en relevant que la dégradation, tout comme l'amélioration du statut organique touche d'abord le haut de l'épipédon (0-5 cm). Ils notent aussi que le rapport C/N est stabilisé entre 10,5 et 13,5 ; ce qui est faible par rapport aux échantillons de Kodek et Zouana. Mekem (2013) a trouvé à Zouana une teneur en matière organique variant entre 0,84 et 2,95%. Ce qui illustre une faible teneur des sols en cette matière, n'atteignant même pas la moitié de la teneur moyenne d'un sol agricole idéal, qui est de 5%. Madi *et al.* (2000) ont trouvé dans cette zone soudano-sahélienne que les teneurs

en carbone organique et en azote de l'horizon A sont significativement plus importantes sur sol non labouré et sur sol à *Mouskwaari* (*Karal*) que sur sol permanemment cultivé. Ces taux sont largement en dessous de 7,24% de matière organique obtenue par Reboul (1997) sous couverture vive après trois ans d'essais SCV dans les hautes terres de Madagascar. On observe tout de même que la teneur de la matière organique à Kodek a connu une hausse sur les parcelles à *Crotalaria juncea* ; à partir de l'échantillon de référence (1,67%). On a ainsi une teneur à la fin de saison agricole de la première année de mise en place de 1,79% et de 2,09% au début de la deuxième saison agricole, soit une augmentation de 0,30%, justifiée par le maintien de la biomasse de cette légumineuse *in situ*, à l'abri des animaux et des feux de brousse.

La jachère d'un an a également permis d'accroître la teneur en matière organique de 1,38 à 1,59% à Kodek, soit une hausse de 0,21%. Dugué (2009) observe que l'apport croissant de la matière organique dans le sol favorise le développement de la biodiversité de ce sol. Ce qui n'est pas généralement le cas sur les parcelles louées. En effet, le fait de louer les parcelles pour les cultures sans contrat à long terme (plus de 5 ans) n'encourage pas les locataires à y appliquer une agriculture de conservation ; car ces terrains rendus productifs sont souvent repris par leurs propriétaires. Tsozué *et al.* (2016) indiquent d'ailleurs que seuls 39% des producteurs sont propriétaires terriens en zone cotonnière du Cameroun ; 71% font toujours dans les anciennes pratiques culturelles et 76% relèvent les conflits entre agriculteurs et éleveurs pour les usages concurrentiels des ressources agropastorales (eau, terre, paille, résidus cultureux, arbres, ...).

Tableau 19 : Matière organique à Kodek

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
CO (%)	0,97	1,04	1,21	0,80	0,92
MO (%)	1,67	1,79	2,09	1,38	1,59
Ntot. (g/kg)	0,32	0,58	0,91	0,28	0,41
C/N	30,31	17,93	13,30	28,57	22,44

Tableau 20 : Matière organique à Zouana

Désignation	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
CO (%)	1,21	1,11	1,18	0,97	1,30
MO (%)	2,09	1,91	2,03	1,67	2,24
Ntot. (g/kg)	0,50	0,40	0,55	0,32	0,80
C/N	24,00	27,75	21,45	30,00	16,00

L'accroissement de la teneur en matière organique du sol permet aussi d'assurer sa stabilité structurale et limite par ailleurs l'effet d'érosion et le stress hydrique des plantes, 1g de matière organique pouvant retenir 100 g d'eau. Boli (1996) estime au Nord-Cameroun une perte de 2 tonnes/ha/an de terre sur SCV, contre 7,2 tonnes/ha/an sur bandes enherbées et 26,3 tonnes/ha/an sur labour. Le contrôle de l'érosion au Mali par les aménagements en ados ou bourrelets a permis de faire un gain de 30% en rendements des céréales. En outre, pour limiter les phénomènes d'acidification du sol observés dans la zone, Dugué (2009) recommande l'apport de la fumure organique afin de maintenir ou relever son taux dans le sol ; la limitation de l'usage des engrais acidifiants comme l'azote ammoniacal et uréique, le KCl, le superphosphate simple et enfin la réinsertion de la jachère dans les systèmes de culture.

De même à Zouana, cette tendance a été remarquée : une hausse de 6,28% sur les parcelles à *Crotalaria juncea* (1,91 à 2,03%) et 34,13% sur jachère (1,67 à 2,24%) ; bien que la teneur en début d'étude qui était de 2,09% ait connu une diminution du fait d'une très forte minéralisation. La forte minéralisation ne permet pas facilement au sol de restaurer et d'atteindre le niveau idéal en matière organique (5%) ; ce qui permet simplement le maintien de la capacité de production du sol et non une régénération ou une restauration véritable. Cela d'autant plus sur la terre de parc ou le fumier, qui sont prédigérés et dont le processus de minéralisation est entamé avant leur application au sol. La minéralisation sur les sols SCV est par contre moins forte et le microclimat créé permet d'avoir les effets bénéfiques pendant au moins trois ans. La forte minéralisation de la matière organique atteint généralement le pic peu après l'installation des pluies, lorsqu'un cumul de l'ordre de 100 mm est enregistré. On parle alors de la flèche de minéralisation, qui correspond à la période où l'activité microbienne est très intense, favorisée par une température et une humidité du sol raisonnables. Par ailleurs, la teneur

en azote est meilleure (4%) pendant la floraison de *Crotalaria juncea* et décroît avec la production des graines ; c'est pour cette raison que la fauche des plants de *Crotalaria juncea* est indiquée lorsque 50% des fleurs apicales sont ouvertes (Treadwell et Alligood, 2013). Elle peut produire plus de 5000 lb/acre soit plus de 5603 kg/ha de matière sèche et 120 lb/A, soit 134 kg/ha d'azote en 9 à 12 semaines (Clark, 2007). Les parcelles fertilisées et désherbées ont produit 5,6 à 6,2 ST/A, soit 12553 à 13898 kg/ha (Duke, 1983). Les feuilles ont une concentration en azote de 2 à 5% et les racines et les tiges en ont entre 0,6 et 2% (Treadwell et Alligood, 2013).

Les feuilles et les fleurs comptent pour 50% d'azote total pendant la saison de production et 50 à 60% de la biomasse pendant les 4 à 6 premières semaines. Plus tard, les tiges deviennent dominantes dans la biomasse. Les racines extraites des échantillons des sols à 24 *inches* (soit 60,96 cm) ont 6% de l'azote total de la plante et 10-13% de la biomasse totale à la fin du cycle et une faible quantité de racines est retrouvée au-delà de 24 *inches* (Cherr *et al.*, 2006). Pour estimer le taux d'azote total pouvant être disponible pour l'utilisation des plantes, il faut multiplier le coefficient de disponibilité par l'azote total. Le coefficient de disponibilité est une estimation de la fraction de l'azote de la plante disponible, incluant le nitrate et l'ammonium. En Florida, le *Best Management Practices* (BMPs) recommande un coefficient de disponibilité de 50% pour les cultures maraîchères (FLDACS, 2004). Par exemple, si la contribution totale en azote de la plante de couverture est de 200 lb/A (soit 2242 kg/ha), seuls 50% d'azote, soit 100 lb/A (1121 kg/ha) seront transformés et libérés en nitrate ou ammonium pendant une saison agricole. Les microorganismes telluriques sont nécessaires pour cette transformation qui produit les nutriments des plantes. Toutefois, cette transformation est influencée par la variabilité des facteurs biotiques et abiotiques de la zone. En Floride du Sud, l'espèce *Crotalaria juncea* a accumulé plus d'azote que les autres plantes de couverture testées. A 120 JAS et incorporée à la tomate, la crotalaire a eu une teneur en azote total de 247-318 lb/A soit 277-356 kg/ha, comparée au *Mucuna deeringiana* (*velvetbean*) de 154-255 lb/A, soit 173-286 kg/ha et au niébé, *Vigna unguiculata* (*cowpea*) avec 67-217 lb/A, soit 75-243 kg/ha (Wang *et al.*, 2005). En Florida du Centre, *Crotalaria juncea* cultivée comme plante de couverture avant la mise en place du maïs sucré (*Zea mays rugosa*) a produit 130-153 lb/A, soit 146-171 kg/ha d'azote total à partir

de 3,3-5,4 t/A, soit 8154-13344 kg/ha de biomasse sur une période de 12 à 14 semaines en 2001 et 2002 respectivement (Cherr *et al.*, 2006). En zone sableuse des climats chauds, la période observée entre la libération de l'azote de l'engrais vert et son prélèvement par la plante peut se traduire par des pertes significatives en azote (Cherr *et al.*, 2006 ; Wang *et al.*, 2005).

NB : A : Acre, 1A = 4046,8564224 m²

lb : livre, 1 lb = 1 *pound* = 0,45359237 kg

Inch : pouce, 1 *inch* = 1 pouce = 2,54 cm

En effet, les engrais minéraux apportés à un sol donné se trouvent peu valorisés lorsque la teneur en matière organique de ce sol est faible (CIRAD, 2008b ; Levrat, 2010), car les bases échangeables, qui devraient se fixer sur le complexe argilo-humique (polarisé plus généralement en charges négatives), se retrouvent plutôt dans la solution. Et ces bases subissent donc le lessivage, la lixiviation ou sont plus facilement emportés par les eaux de ruissellement. Les nitrates (NO₃⁻) étant par contre chargés négativement ne sont pas ou très rarement fixés sur ce complexe absorbant et percolent plus facilement vers la profondeur des sols. D'où la recommandation en faveur d'une application fractionnée de ces types d'engrais en deux ou trois phases. Les engrais ammoniacaux (NH₄⁺) sont en outre bien fixés par le complexe argilo-humique, bien que ce soit la forme nitrique qui est celle prédominante d'azote absorbée par le maïs dans les écosystèmes agricoles (Mvondo Awono, 1997). Tsozué *et al.* (2015) ont également obtenu que l'azote total et la teneur en matière organique sont plus élevés en SCV par rapport aux autres systèmes.

Le rapport C/N qui renseigne sur le niveau de minéralisation de la matière organique est donc un bon indicateur de minéralisation. À teneur en carbone égale entre deux échantillons, l'échantillon qui a une bonne minéralisation aura un rapport C/N plus bas. Le seuil normal du rapport C/N étant égal à 12, on observe que tous les échantillons de la présente étude ont une valeur supérieure à 12. Ce qui connote que la quantité d'azote est faible dans ces sols-là, et ne corrobore pas avec les données obtenues par Tsozué *et al.* (2015) où le rapport C/N varie de 1,4 à 4,23 à Zouana. En outre, le rapport C/N < 6 suggère que la matière organique présente des taux élevés de décomposition microbienne et cette intensité de vie biologique est favorisée par les engrais azotés comme l'urée avec l'objectif de lever la faim d'azote. La quantité élevée en azote de la

plante de couverture peut être un risque pour la qualité de l'eau si le rapport C/N est inférieur à 20:1. Ce qui est le cas des sols à *Crotalaria juncea* en fin saison 1 ; en début de saison 2 à Kodek et du sol à Jachère d'un an en début saison 2 à Zouana. La biomasse est dans ce cas plus abondante. L'excès des nitrates dans la solution du sol s'accroît lorsque la plante de couverture suit un semis direct, où les semences prennent du temps à développer les racines efficaces au prélèvement des minéraux. Aussi, l'infiltration des eaux de pluie et l'irrigation peuvent entraîner l'azote vers des horizons profonds, inaccessibles aux premières racines. On connaît les risques à utiliser une fumure organique trop riche en carbone (en paille) dont le rapport C/N est élevé. L'enfouissement de paille de céréales a mis en évidence que la décomposition du C apporté au sol entraînait une mobilisation des rares quantités de N présentes dans le sol par les micro-organismes d'où une faim d'azote pour les cultures et même dans certains cas un appauvrissement du sol en N. De ce fait, il ne faut pas espérer faire des miracles avec les composts issus simplement des pailles de céréales. D'où les suggestions de Dugué (2009) pour les 3 types de fumure organique : la fosse domestique, la fosse fumièrre et la fosse compostière au champ.

5.2.7 Cations et acidité échangeables

On observe sur le site de Kodek (Tableau 21) que la somme des bases échangeables (S) connaît globalement une diminution de la période du prélèvement de référence (4 méq/100 g en début de saison 1) à la fin de la saison 1 (2,67 méq/100 g sur *Crotalaria juncea* et 1,33 méq/100 g sur jachère) : ce qui se justifie par les cations (Ca, Mg, K et Na), mobilisés pour la nutrition des plants de *Crotalaria juncea* et des espèces développées sur la jachère. Ces valeurs diffèrent peu de celle obtenue par Brabant (1995a) à Ndock qui est de 2 méq/100g. Il y a toutefois une augmentation de la teneur de ces bases pendant la saison sèche (entre la fin de la saison 1 et le début de la saison 2) ; ceci aussi bien sur les parcelles de *Crotalaria juncea* que celles en jachère. Cette tendance est également observée à Zouana (Tableau 22) où la somme des bases échangeables a augmenté de manière substantielle sur la jachère (0,73 à 3,96 méq/100 g). Les espèces herbacées développées spontanément sur ces parcelles en jachère ont donc libéré grâce à la minéralisation, une bonne quantité de Ca (0,38 à 2,64 méq/100 g).

Tableau 21 : Cations échangeables en milliéquivalents/100g à Kodek

Cations	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
Calcium	2,48	1,85	2,10	0,75	1,18
Magnésium	1,40	0,75	0,80	0,50	0,62
Potassium	0,08	0,04	0,11	0,06	0,08
Sodium	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
S. des bases	4,00	2,67	3,03	1,33	1,90

Tableau 22 : Cations échangeables en milliéquivalents/100g à Zouana

Cations	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
Calcium	1,20	0,98	1,65	0,38	2,64
Magnésium	0,42	0,42	0,82	0,25	1,22
Potassium	0,08	0,05	0,10	0,08	0,08
Sodium	0,04	0,02	0,04	0,02	0,02
S. des bases	1,74	1,47	2,61	0,73	3,96

On constate aussi bien sur le site de Kodek que celui de Zouana que l'acidité échangeable (en méq/100 g) est nulle en matière de H+Al, d'Al et de H (Tableau 23). Ce qui signifie que ces éléments bien que présents dans le sol, ne se retrouvent pas dans la solution du sol ; ils sont en effet solidement fixés par le complexe absorbant ou par d'autres liaisons qui les rendent insolubles : les cultures ne souffriraient donc pas d'un problème de toxicité aluminique. Ce qui est justifié par le fait que le pH-H₂O des différents échantillons de sol analysés soit supérieur à 4,8 ; bien que la phytotoxicité due à l'aluminium puisse parfois être ressentie à partir du pH inférieur à 5,5 selon les types des sols. Ces valeurs nulles d'acidité échangeable diffèrent toutefois de celles obtenues à Ndock par Brabant (1995a) où l'Aluminium échangeable varie de 0,1 à 0,2 méq/100g.

Tableau 23 : Acidité échangeable cationique en méq/100g à Kodek et à Zouana

Eléments	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
H+Al (AE)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Al	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.2.8 Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) effective varie de 1,33 à 4,00 méq/100 g de terre à Kodek et de 0,73 à 3,96 méq/100 g de terre à Zouana (Tableaux 24 et 25). La CEC à pH7 varie de 9,12 à 13,20 à Kodek et de 7,6 à 12,18 à Zouana. On observe toutefois que sur le site de Kodek, la CEC diminue entre l'échantillon de référence et l'échantillon de sol à crotalaire en fin de cycle : la crotalaire a donc prélevé la plupart des cations pour son développement. Etant donné que la CEC représente la capacité d'un sol à retenir les éléments minéraux et à les rendre disponibles aux plantes (Bationo *et al.* 2007) ; plus la CEC est élevée, plus les minéraux sont disponibles pour la nutrition des cultures. En effet, les cations échangeables dominants sont : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Al^{3+} et $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, H^+ , Mn^{2+} et Fe^{2+} et représentent la capacité d'échange cationique tandis que les 4 premiers cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) constituent la somme des bases échangeables.

Dans les sols acides, les cations suivants dominent : Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Al^{3+} selon le type de sites d'échanges, le pH et leur abondance relative. Dans les sols calcaires, Ca^{2+} et Mg^{2+} dominent tandis que dans les sols salins, c'est le Na^+ qui domine. Les valeurs de la CEC à pH7 à Kodek de cette étude sont au-dessus de celles obtenues par Brabant (1995a), soit 7 méq/100g avec un taux de saturation de 28,5% et par ORSTOM en 1962 (entre 3 et 7 méq/100g, avec une somme totale entre 2,5 et 5 méq/100 g fixée sur le complexe absorbant). Par contre, Seiny-Boukar et Pontanier (1993) ont trouvé des valeurs de CEC pouvant atteindre 35 méq/100g sur vertisols dégradés. Par ailleurs, Tsozué *et al.* (2015) ont trouvé à Zouana que les valeurs de la CEC sont élevées sur sol labouré et en fertilisation de 100 kg NPK/ha et 25 kg Urée/ha et que la saturation des bases est plus élevée sur le témoin et le SCV que sur les autres systèmes. Le rapport S/CECE étant égal à 100% (soit $S = \text{CECE}$) pour tous les échantillons de sol, on peut en déduire que tous les éléments minéraux fixés sur le complexe absorbant sont susceptibles d'être libérés pour la nutrition des plantes.

Tableau 24 : Capacité d'échange cationique en méq/100g à Kodek

Désignation	Sol de référence en début saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
CEC effective	4,00	2,67	3,03	1,33	1,90
S/CECE (%)	100	100	100	100	100
CEC pH7	13,2	9,12	11,48	10,56	11,08
Saturation (%)	30	29	26	13	17

Tableau 25 : Capacité d'échange cationique en méq/100g à Zouana

Désignation	Sol de référence en début saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
CEC effective	1,74	1,47	2,61	0,73	3,96
S/CECE (%)	100	100	100	100	100
CEC pH7	7,6	10,82	12,18	10,0	12,3
Saturation (%)	23	14	21	7	32

En effet, les ions peuvent être sous formes échangeables, liées à la matière organique ou aux minéraux argileux. En conditions très acides, les ions Al^{3+} et H^+ et les liens H et Al dominant. En conditions alcalines, les cations basiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , etc.) dominant. Enfin, les hydroxydes d'aluminium échangeables comme $Al(OH)_2^+$ dominant dans les conditions intermédiaires. La matière organique contribue de 20 à 50% à la capacité d'échange du sol. La teneur en carbone et l'avancement de la décomposition sont des facteurs importants dans ce processus. Les sites d'échanges proviennent des groupes fonctionnels organiques qui ont le pouvoir d'échanger des ions hydrogène et de former des sels basiques. Ces groupes d'atomes sont généralement :

Carboxyliques



Hydroxyliques



Imides



Énoliques



Un grand nombre de cations sont toutefois retrouvés dans les sols sous des formes non échangeables. Des quantités non échangeables de Ca^{2+} ; Mg^{2+} et K^+ de 76,9 ; 96,2 et 99,6% respectivement par rapport à la concentration totale de ces éléments sont possibles. Ces formes non échangeables seront libérées lentement lors de l'altération et de la décomposition de la matière organique. Malgré la prépondérance des échanges cationiques, on retrouve aussi des échanges anioniques dans les sols, c'est la capacité d'échange anionique (CEA), avec les anions échangeables : NO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} . Ceux-ci sont spécialement importants dans les sols acides altérés riches en oxydes hydratés et en kaolinite (Giasson et Jaouich, 2008).

5.2.9 Phosphore assimilable

Le phosphore assimilable des échantillons des sols a été extrait par la méthode Bray II, et représente le phosphore pouvant être facilement prélevé par la plante sur le phosphore total d'un échantillon. Sa teneur varie de 8,40 à 12,41 mg/kg ou ppm à Kodek et de 6,28 à 12,40 mg/kg à Zouana. Cette teneur décroît pendant la campagne agricole, le phosphore étant prélevé par les plantes. Aussi bien sur *Crotalaria juncea* que sur la jachère à Kodek comme à Zouana, sa teneur croît pendant l'intercampagne (Tableau 26), ceci à la faveur de sa minéralisation par les organismes telluriques. (Forestier, 1958) estime que les besoins d'engrais phosphatés sont impérieux sur terres légères lorsque la teneur en phosphore assimilable est inférieure à 100 ppm. Ce qui est largement le cas sur les présents sites de l'étude.

Tableau 26 : Phosphore assimilable à Kodek et à Zouana : Bray II (mg/kg)

P assimilable	Sol de référence (début saison 1)	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en fin saison 1	Sol à <i>Crotalaria juncea</i> en début saison 2	Sol à Jachère d'un an en fin saison 1	Sol à Jachère d'un an en début saison 2
Kodek	12,10	8,72	12,41	8,40	11,72
Zouana	9,21	6,28	10,22	10,72	12,40

Chapitre 6 : Paramètres cultureux et rendements agricoles

Les paramètres cultureux de la crotalaire (potentiel de fixation d'azote, densité, taille, biomasse) et les rendements des cultures (maïs et coton) comme réponse des sols aux différents itinéraires techniques orientent les choix agro-économiques des agrosystèmes.

6.1 Potentiel de fixation symbiotique de l'azote

On observe à priori que certains plants de l'espèce *Crotalaria juncea* ne portent pas de nodosités. On a cependant 85% de plants à nodosités à Kodek et 75% à Zouana, avec respectivement 6,71 et 5,60 nodosités/plant. 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 (Tableau 27). 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. En effet, 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 où 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 (CIRAD-GRET, 2002). L'azote fixé est ainsi utilisé par la plante hôte (crotalaire) 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 27 : Efficacité des nodosités 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%

Aussi, l'azote atmosphérique, n'étant pas directement utilisable par les végétaux, peut subir des réactions biologiques ou chimiques avant leur assimilation. La fixation chimique de cet azote peut se faire à travers son oxydation sous l'effet des décharges électriques en présence d'oxygène ; et on obtient les nitrates (NO_3^-). Il peut aussi s'agir de la réduction de cet azote par la vapeur d'eau grâce aux rayons UV, où l'on obtient plutôt les ions ammonium (NH_4^+). En plus des microorganismes symbiotiques comme *Rhizobium japonicum*, on distingue les microorganismes libres qui interviennent dans le cycle biologique de l'azote, dont les bactéries hétérotrophes (*Azobacter*, *Azomonas*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Bacillus*, *Clostridium*), les bactéries autotrophes (*Thiobacillus*, *Rhodospirillum*, *Rhomicrobium*, *Rhodopseumonas*) et les cyanophycées ou algues bleues (*Nostoc*, *Anabaena*, *Plectonema*). La fixation symbiotique de l'azote rentre en effet dans le cycle de l'azote, avec la production des nitrates (NO_3^-) et des ions ammonium (NH_4^+) notamment. En revanche, ce cycle peut être une source de pollution : les nitrates peuvent être drainés dans les nappes phréatiques ; le N_2O est un gaz à effet de serre et interfère avec l'ozone émis par les rizières et les sols engorgés ou bien drainés ; le NH_3 et le NO émis par les plantes, les sols, les animaux, les résidus d'élevage et les feux séjournent dans l'atmosphère puis retombent sur le sol sous l'effet de pluie ou de dépôt direct (CIRAD-GRET, 2002).

6.2 Paramètres culturaux de la crotalaire

6.2.1 Densité des plants de crotalaire

Les résultats de la densité (poquets/ha et plants/ha) sont présentés dans le Tableau 28.

Tableau 28 : Poquets/ha et plants/ha de crotalaire à Kodek et Zouana

Parcelle	Site de Kodek		Site de Zouana	
	Poquets/ha	Plants/ha	Poquets/ha	Plants/ha
C1	86281±3137	166287±8100	87531±1353	174131±3137
C2	87850±5123	166287±10868	87850±0000	172562±6275
C3	84712±3622	167856±9412	87850±0000	172562±6275
C4	86281±3137	161581±13913	86281±3137	163150±11456
Moyenne	86281±3622	165503±9954	87065±2143	170601±8009
R²	0,1	0,06	0,143	0,315
Pr > F	0,726	0,857	0,588	0,194

On observe qu'il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% pour toutes les modalités (poquets/ha, plants/ha) aussi bien à Kodek qu'à Zouana, toutes les valeurs de F étant supérieures à 5%. On obtient ainsi en moyenne sur le site de Kodek et en fin du cycle, 165503 plants/ha développés sur 86281 poquets/ha, soit 1,91 plants/poquet au lieu de 2 au démarrage de la crotalaire. De même, sur le site de Zouana, 170601 plants/ha ont été produits sur 87065 poquets/ha, soit 1,95 plants/poquet. Ainsi, 34497 plants/ha à Kodek et 29398 plants/ha à Zouana ont péri pendant leur cycle de développement, soit par effet de concurrence en eau, en lumière et en éléments nutritifs, soit pendant les opérations d'entretien (le désherbage notamment). Toutefois, les plantes ont l'habilité d'accroître leur développement à l'effet de combler le vide laissé par les plants crevés.

6.2.2 Taille des plants de crotalaire

La taille moyenne des plants est de $2,814 \pm 0,190$ m à Kodek (Figure 32) et de $2,412 \pm 0,228$ m à Zouana. On observe globalement que la taille moyenne des plants à Kodek dépasse celle de Zouana de 0,402 m (Tableau 29). Ce qui est justifié par la différence des caractéristiques pédologiques et des conditions climatiques entre les deux sites.



Figure 32 : Plants de crotalaire à 90 JAS à Kodek

Les différentes tailles des plants obtenues aussi bien à Kodek qu'à Zouana rentrent dans l'intervalle de 1,5 à 3,5 m indiqué par Maroyi (2011) et par Fernandes et *al.* (2014) soit 1 à 4 m. Malgré la variation de la taille sur les deux sites, on observe qu'il n'y a donc pas de différence significative au seuil de 5% entre la taille des plants à Kodek et à Zouana pris isolément ($P = 0,113$ à Kodek et $P = 0,162$; donc supérieur à 5%). Toutefois, toutes les données de Kodek et de Zouana traitées ensemble donnent une moyenne globale en taille de 2,613 m pour un écart-type de 0,291 ; une régression R^2 : de 0,563 ; $F = 11,418$ et $Pr > F : 0,0001$. La différence devient donc significative à 5% (test de Duncan) lorsqu'il y a homogénéisation des données des deux sites ($P = 0,0001 < 0,005$). La corrélation de la taille par rapport aux 4 parcelles de chaque site – bien que faible – est un peu plus élevée à Kodek 0,151 qu'à Zouana 0,131.

Tableau 29 : Taille des plants de crotalaire à 90 JAS

Parcelle	Taille à Kodek (m)	Taille à Zouana (m)
C1	2,750±0,103 ^a	2,451±0,170 ^{cd}
C2	2,736±0,168 ^{ab}	2,351±0,300 ^{cd}
C3	2,907±0,217 ^a	2,319±0,214 ^d
C4	2,863±0,214 ^a	2,525±0,174 ^{bc}
Moyenne	2,814±0,190	2,412±0,228
R²	0,151	0,131
Pr > F	0,113	0,162
Moyenne des 2 sites	2,613±0,291	
R² des 2 sites	0,563	
Pr > F des 2 sites	0,0001	

C1, C2, C3, C4 représentant les 4 parcelles de crotalaire par site.

Les valeurs ayant les mêmes lettres *a, b* ou *c* sur la même colonne sont statistiquement homogènes, donc il n'y a pas de différence significative entre ces valeurs au seuil de 5%.

6.2.3 Biomasse des plants de crotalaire

Les résultats des pesées donnent en moyenne 113,93 g/plant de biomasse sèche totale à Kodek (Tableau 30) et 92,28 g/plant à Zouana (Tableau 31). La teneur en eau évaporée obtenue lors de la dessiccation des plants est de 58,26% à Kodek et 58,82% à Zouana et correspond simplement à la quantité d'eau évaporée. En effet, il reste environ 10% d'eau dans la biomasse sèche. La biomasse sèche racinaire est en moyenne de 2340,67 kg/ha à Kodek et 2420,84 kg/ha à Zouana ; tandis que la biomasse sèche aérienne est de 15603,89 kg/ha à Kodek et de 13322,31 kg/ha à Zouana (Tableaux 32 et 33). Malgré la variation des différentes données, il n'y a pas de différence significative au seuil de 5% entre les différentes biomasses sur le même dispositif expérimental.

Tableau 30 : Masse d'un plant de crotalaire (g) et teneur en eau à Kodek

Parcelle	Biomasse humide			Biomasse sèche			Teneur en eau évaporée
	Racinaire	Aérienne	Totale	Racinaire	Aérienne	Totale	
C1	38,76	312,81	351,57	15,38	129,91	145,29	58,67%
C2	26,70	169,06	195,76	12,65	79,96	92,61	52,69%
C3	29,76	272,34	301,10	14,60	96,87	111,47	62,98%
C4	29,08	213,38	242,46	13,42	92,96	106,38	56,12%
Moyenne	31,07±05	241,89±63	272,96±67	14,01±1	99,92±21	113,93±22	58,26%

Tableau 31 : Masse d'un plant de crotalaire (g) et teneur en eau à Zouana

Parcelle	Biomasse humide			Biomasse sèche			Teneur en eau évaporée
	Racinaire	Aérienne	Totale	Racinaire	Aérienne	Totale	
C1	27,54	242,04	269,58	16,54	86,27	102,81	61,86%
C2	15,17	141,89	157,06	11,54	54,02	65,56	58,26%
C3	27,44	204,73	232,17	12,93	72,43	85,36	63,23%
C4	32,36	205,24	237,6	15,77	99,64	115,41	51,43%
Moyenne	25,63±07	198,47±41	224,1±47	14,19±02	78,09±19	92,28±21	58,82%

Tableau 32 : Biomasse racinaire sèche de crotalaire produite à l'hectare

Parcelle	Site de Kodek			Site de Zouana		
	Nombre de plants/ha	Masse racinaire d'un plant (g)	Biomasse racinaire sèche (kg/ha)	Nombre de plants/ha	Masse racinaire d'un plant (g)	Biomasse racinaire sèche (kg/ha)
C 1	166288	15,38	2557,51	174131	16,54	2880,12
C 2	166288	12,65	2103,54	172563	11,54	1991,38
C 3	167856	14,60	2450,69	172563	12,93	2231,24
C 4	167856	13,42	2252,62	163150	15,77	2572,87
Moyenne	167072±905	14,01±01	2340,67±202	170602±5022	14,19±02	2420,84±389

Tableau 33 : Biomasse aérienne sèche de crotalaire produite à l'hectare

Parcelle	Site de Kodek			Site de Zouana		
	Nombre de plants/ha	Masse aérienne d'un plant (g)	Biomasse aérienne totale (kg/ha)	Nombre de plants/ha	Masse aérienne d'un plant (g)	Biomasse aérienne totale (kg/ha)
C 1	166288	129,91	21602,47	174131	86,27	15022,28
C 2	166288	79,96	13296,38	172563	54,02	9321,85
C 3	167856	96,87	16260,21	172563	72,43	12498,73
C 4	167856	92,96	15603,89	163150	99,64	16256,26
Moyenne	167072±905	99,92±21	15603,89±3512	170602±5022	78,09±19	13322,31±3064

La biomasse sèche totale de la crotalaire produite sans apport d'engrais sur les différentes parcelles est comprise entre 15,39 et 24,15 tonnes/ha avec une moyenne de 19,03 tonnes/ha à Kodek et entre 11,31 et 18,82 tonnes /ha avec une moyenne de 15,74 tonnes/ha à Zouana (Tableau 34). Fernandes et al. (2014) observent que cette bioressource produit en Martinique 10 à 15 t/ha/cycle d'engrais vert avec un taux de couverture du sol de 85 à 90%. Pour l'espèce *Brachiaria ruziziensis*, Mvondo Awono et al. (2012) ont obtenu au Nord-Cameroun, une biomasse sèche totale de 25 t/ha, soit 20 tonnes/ha de biomasse aérienne. Ce qui, de part et d'autre, est largement au-dessus de la valeur de 6 t/ha, habituellement recommandée, bien que certains chercheurs souhaitent que cette recommandation soit portée à 10 t/ha, en raison de la forte minéralisation de la matière organique dans cette zone agroécologique. Les valeurs des rendements en matière sèche de crotalaire obtenues sont également au-dessus de celles de 14 t/ha, relevées par Brink et Achigan-Dako (2005) au Zimbabwe.

Tableau 34 : Biomasse sèche totale de crotalaire produite à l'hectare

Répétitions	Site de Kodek			Site de Zouana		
	Densité (plants/ha)	Masse d'un plant (g)	Biomasse sèche totale (kg/ha)	Densité (plants/ha)	Masse d'un plant (g)	Biomasse sèche totale (kg/ha)
C 1	166288	145,29	24159,78	174131	102,81	17902,41
C 2	166288	92,61	15399,93	172563	65,56	11313,23
C 3	167856	111,47	18710,91	172563	85,36	14729,98
C 4	167856	106,38	17856,52	163150	115,41	18829,14
Moyenne	167072±905	113,93±22	19034,51±3695	170602±5022	92,28±21	15743,15±3407

L'un des effets probants de cette biomasse est le contrôle de l'érosion du sol, lequel sol, sans protection est exposé à la dégradation, avec parfois l'installation des rigoles ou même des ravins plus ou moins larges, plus ou moins profonds, réduisant ainsi les surfaces exploitables (Figure 33).



Figure 33 : Décapage du sol dû à l'érosion hydrique

La fixation symbiotique contribue donc à la nutrition azotée de la plante et les racines de la crotalaire explorent un volume important du sol pour prélever les minéraux ; ce qui lui permet de se développer plus facilement là où beaucoup de plantes ont la peine à s'adapter ou à se développer, à l'exemple du niébé, *Vigna unguiculata* autour du site expérimental de Moussourouk au Nord-Cameroun (Figure 34).



Figure 34 : Développement remarquable de la crotalaire sur un *hardé*

Étant entendu que l'intensité de la corrélation R^2 va croissante de 0 à 1, et étant donné qu'à Kodek, $R^2 = 0,0546$ et à Zouana $R^2 = 0,2575$ (test de Duncan), il est noté que la corrélation est faible entre la quantité de biomasse produite et la densité des plants de crotalaire à l'hectare sur les deux sites, bien que cette corrélation soit un peu plus élevée à Zouana. Ce qui dénote que les plants à densité plus faible comblent donc l'espace autour d'eux en ayant à leur disposition plus de facteurs d'assimilation chlorophyllienne (eau, air, lumière, nutriments) et en accroissant de ce fait leur croissance et leur développement. L'équation de la courbe de régression est :

$$y = -0,0573x + 168162 \text{ à Kodek}$$

$$y = -0,7480x + 182348 \text{ à Zouana.}$$

Il en ressort ainsi que le coefficient directeur (ou pente) est négatif aussi bien à Kodek qu'à Zouana, ce qui signifie qu'à un certain seuil, plus le nombre de plants de crotalaire augmente, plus sa biomasse diminue. Ce qui se justifie par les effets de concurrence pour la lumière et les nutriments entre les plantes lorsque la densité est plus forte, avec effet de limitation de leur croissance et de leur développement. La corrélation entre la biomasse totale produite et la densité des plants de crotalaire est globalement très faible à Kodek ($R^2 = 5,46\%$) et faible à Zouana ($R^2 = 25,75\%$).

En somme, l'espèce *Crotalaria juncea* comme plante de couverture associée présente d'importants atouts. Elle contribue à la séquestration du carbone de par la mobilisation du CO_2 pour la photosynthèse et assure donc la lutte contre la pollution et l'effet de serre. Elle lutte contre l'érosion hydrique en favorisant l'infiltration de l'eau, ce qui permet de conserver l'humidité des sols même en temps de sécheresse. Cultivée à forte densité, elle limite également l'effet de l'érosion éolienne en jouant le rôle de haie vive. Elle sert en outre comme plante de végétalisation des aménagements et corrige les ravins. La réduction de la dose d'utilisation d'engrais minéraux dans ce système limite leur effet éventuel de pollution sur l'environnement. De même, les racines de la crotalaire suffisamment profondes (1 m et plus) ramènent en surface les éléments nutritifs des profondeurs que certaines plantes à enracinement peu profond sont incapables de prélever. Ces racines contribuent à décompacter les sols et à augmenter leur porosité. Leur décomposition dans le sol ainsi que la décomposition des chaumes

améliorent la teneur en matière organique du sol, améliorant ainsi les propriétés du complexe argilo-humique et la capacité d'échange cationique. En limitant le ruissellement et en favorisant l'infiltration d'eau, elle lutte contre l'érosion hydrique et éolienne pouvant décaper la surface arable du sol et entraîner ainsi la perte des éléments nutritifs des plantes cultivées. L'amélioration de la capacité de rétention d'eau du sol liée à l'augmentation de la teneur du sol en matière organique permet aux cultures de supporter aisément les poches de sécheresse souvent observées dans la zone et au final accroître leur productivité.

6.3 Rendements comparés en maïs

Les différents rendements obtenus sont illustrés sur le Tableau 35 pour le site de Kodek et le Tableau 36 pour le site de Zouana.

Tableau 35 : Productivité du maïs à Kodek

R 1	CM	C	N3	N2	N0	N4	N1
Epis (8m)	25	24	21	26	27	21	22
Poids épis	2,3	2,6	2,4	2,2	1,3	3	2,3
Poids maïs	1,90	2,15	1,99	1,82	1,08	2,48	1,90
Rendement	2996,97	3387,88	3127,27	2866,66	1693,94	3909,09	2996,97
R 2	N4	N3	N0	CM	N1	C	N2
Epis (8m)	22	23	26	21	21	25	21
Poids épis	2,2	2,5	1,5	1,8	1,8	1,8	2,6
Poids maïs	1,82	2,07	1,24	1,49	1,49	1,49	2,15
Rendement	2866,66	3257,57	1954,54	2345,45	2345,45	2345,45	3387,88
R 3	N0	N2	C	N1	N4	CM	N3
Epis (8m)	25	23	27	27	23	24	24
Poids épis	2,2	2,8	2,8	2,4	2,3	1,8	2,4
Poids maïs	1,82	2,32	2,32	1,99	1,90	1,49	1,99
Rendement	2866,66	3648,48	3648,48	3127,27	2996,97	2345,45	3127,27
R 4	C	CM	N1	N4	N2	N3	N0
Epis (8m)	24	26	24	25	22	25	25
Poids épis	2,6	2,2	2,6	2,6	2,1	2,6	2,1
Poids maïs	2,15	1,82	2,15	2,15	1,74	2,15	1,74
Rendement	3387,88	2866,66	3387,88	3387,88	2736,36	3387,88	2736,36

R1, R2, R3, R4 correspondant aux 4 répétitions du dispositif.

Poids épis et maïs en kg et Rendement en kg/ha.

Les parcelles C : maïs sur mulch de crotalaire sans apport de N ; CM : maïs en association avec la crotalaire ; N0 : maïs avec 0 kg/ha N ; N1 : maïs avec 80 kg/ha N ; N2 : maïs avec 160 kg/ha N ; N3 : maïs avec 240 kg/ha N et N4 : maïs avec 320 kg/ha N.

Tableau 36 : Productivité du maïs à Zouana

R 1	CM	C	N3	N2	N0	N4	N1
Epis (8m)	26	27	22	25	27	22	24
Poids épis	2,2	2,6	2,6	2,4	1,6	3,2	2,5
Poids maïs	1,89	2,24	2,24	2,07	1,38	2,75	2,15
Rendement	2981,84	3523,99	3523,99	3252,92	2168,61	4337,22	3388,46
R 2	N4	N3	N0	CM	N1	C	N2
Epis (8m)	23	19	27	24	23	24	23
Poids épis	1,9	2,6	1,7	1,7	2	2	2,6
Poids maïs	1,64	2,24	1,46	1,46	1,72	1,72	2,24
Rendement	2575,23	3523,99	2304,15	2304,15	2710,76	2710,76	3523,99
R 3	N0	N2	C	N1	N4	CM	N3
Epis (8m)	26	24	28	30	25	22	25
Poids épis	2,4	2,3	2,7	2,4	2,4	2	2,8
Poids maïs	2,07	1,98	2,32	2,07	2,07	1,72	2,41
Rendement	3252,92	3117,38	3659,53	3252,92	3252,92	2710,76	3795,07
R 4	C	CM	N1	N4	N2	N3	N0
Epis (8m)	23	26	24	26	28	24	27
Poids épis	2,4	2,3	2,4	2,7	2,2	2,3	1,5
Poids maïs	2,07	1,98	2,07	2,32	1,89	1,98	1,29
Rendement	3252,92	3117,38	3252,92	3659,53	2981,84	3117,38	2033,07

Le ratio poids moyen de graines d'un épi sur le poids de l'épi a été évalué à travers la pesée de 30 épis avant et après égrenage.

A Kodek, le poids moyen des graines d'un épi de maïs a été calculé :

Poids des graines de 30 épis = 2363,84 g, soit 78,79466 g de maïs par épi.

Poids de 30 épis sans graines : 493,37 g, soit $(2363,84 + 493,37)/30 = 95,24$ g par épi avec graines; les graines représentant donc en moyenne $2363,84 / (2363,84 + 493,37)$, soit 82,732% du poids total d'un épi.

A Zouana, le poids moyen des graines d'un épi de maïs a été aussi calculé :

Poids des graines de 30 épis = 3213,15 g, soit 107,105 g de maïs par épi.

Poids de 30 épis sans graines : 520,62 g soit $(3213,15 + 520,62)/30 = 124,46$ g par épi avec graines; les graines représentant donc en moyenne $3213,15 / (3213,15 + 520,62)$, soit 86,056 % du poids total d'un épi.

Les poids des épis de maïs ainsi obtenus (95,24 g/épi à Kodek et 124,46 g/épi à Zouana) varient peu de ceux rapportés par Krisna et Oumarou (2004) qui se situent entre 106 et

114 g/épi. Par ailleurs, la détermination du *seed index* a été effectuée, le *seed index* étant le poids de 100 graines de maïs, objet de cette étude. Ainsi 600 graines de maïs ont été pesées à la balance électronique. Au site de Kodek le poids de 600 graines = 136,16 g soit un *seed index* de 22,693g pour 100 graines du maïs, soit 0,227 g/graine de maïs. Au site de Zouana le poids de 600 graines = 148,52 g soit un *seed index* de 24,753 g pour 100 graines du maïs, soit 0,248 g/graine de maïs.

Le calcul du rendement (en kg/ha) a été fait sur la base d'une parcelle de 100 m x 100 m, avec donc 100 m /0.80 m soit 125 interlignes et 126 lignes de 100 m de maïs. De ce qui précède et connaissant la valeur Q de la production du maïs sur 8 m (2 lignes de 4 m récoltées), le rendement R sera donc égal à : $R = (Q \times 100 \times 126) / 8$. Ce qui a permis d'obtenir les rendements représentés sur les tableaux 37 et 38.

Tableau 37 : 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 38 : 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

Après l'application du test de Duncan au seuil de signification de 5%, la séparation des moyennes entre les rendements a été faite à Kodek et à Zouana (Tableau 39).

Tableau 39 : Rendements de maïs sur les sites selon le test de Duncan

Modalité de fertilisation	Rendement (kg/ha) Kodek	Rendement (kg/ha) Zouana
C	3192 ± 577 ^b	3286 ± 419 ^{bc}
CM	2638 ± 342 ^{ab}	2778 ± 358 ^{ab}
N0	2312 ± 576 ^a	2439 ± 553 ^a
N1	2964 ± 443 ^{ab}	3151 ± 300 ^{bc}
N2	3159 ± 430 ^b	3219 ± 231 ^{bc}
N3	3224 ± 124 ^b	3659 ± 156 ^c
N4	3290 ± 468 ^b	3456 ± 738 ^{bc}

Les valeurs ayant les mêmes lettres a, b ou c sur la même colonne sont statistiquement homogènes, donc il n'y a pas de différence significative entre ces valeurs au seuil de 5%

Les valeurs de rendements obtenues sur témoin non fertilisé (2312 kg/ha à Kodek et 2439 kg/ha à Zouana) sont toutefois au-dessus de celles obtenues en 2008 à Mafa Kilda par Olina (2010) en semis direct avec usage d'herbicide, soit 1553 kg/ha. Il ressort aussi du Tableau 39 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). Bien que l'association des cultures présente la concurrence pour la lumière, l'eau et les minéraux, Dufumier (1996) observe que cette association peut se traduire par des productions accrues lorsque les composantes exploitent les ressources du milieu de façon complémentaire. En revanche, le maïs cultivé sur le mulch de 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 N0 pour être statistiquement identique à C ; N1 ; N2 et N4. A Kodek comme à Zouana, on observe que les exsudats racinaires issus des nodosités de la crotalaire 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 N_2 . Ce type d'apport en azote comme exsudats 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 élevés de N (160, 240 et 320 kg N/ha). Ce qui signifie que la minéralisation des plants de *Crotalaria juncea* a contribué à augmenter la teneur en éléments fertilisants notamment l'azote ici évalué. 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 rehausser sa capacité de rétention en eau, pour éviter le stress hydrique lié aux poches de sécheresse, parfois observées au Nord-Cameroun en début de campagne agricole (juin et juillet). L'effet pédo-hydrique est donc fort remarquable avec l'augmentation de la teneur en matière organique, laquelle est un puissant hydrorétenteur (Figure 35). Le sol en SCV permet donc de

conduire avec succès l'agriculture climato-intelligente où l'effet du changement climatique est atténué (Hinimbio, 2017). Ce qui permet en outre d'amorcer l'évolution vers la stabilité climacique appelée biostasie, énoncée dans la théorie de bio-rhexistasie d'Henri Erhart, où la végétation couvre les sols et où l'érosion mécanique est faible, avec principalement une altération chimique.



Figure 35 : Sol à mulch bien humide (à gauche) et sol sec (à droite)

Outre le mulch en paille sous le maïs (Figure 36), il est parfois développé le mulch plastique, qui couvre des parcelles billonnées, en planches ou non ; avec une limitation de l'évapotranspiration et avec une teneur en matière organique importante, qui se minéralise progressivement. Et aussi, le contrôle de l'enherbement est quasi-total. C'est le cas de la culture du maïs sur mulch plastique au Centre Régional Songhaï, à Porto Novo au Bénin (Figure 37), où un rendement moyen de 3,20 tonnes/ha est obtenu sans engrais minéral. Ce qui équivaut pratiquement aux rendements obtenus sur le mulch de la crotalaire à Kodek (3,19 tonnes/ha) et à Zouana (3,28 tonnes/ha).



Figure 36 : Maïs sur mulch végétal à Zouana



Figure 37 : Maïs sur mulch plastique au Centre Songhai, Porto Novo
Hinimbio (2017)

Par ailleurs, eu égard à la forte pression sur le foncier et à la baisse de la fertilité des sols, la culture du maïs a été expérimentée avec succès par le projet ESA en 2008 dans les bas-fonds et sur les vertisols inondables. Ceci avec des rendements moyens de 3,5 tonnes/ha, sur des aménagements spécifiques avec des billons de 2 m de large et de 0,5 m de haut, ou sur des planches confectionnées et séparées entre elles par des sillons de 2 m. Sur les billons, est exploité le maïs et même d'autres cultures annuelles comme le coton et dans les sillons parfois cloisonnés des diguettes de retenue d'eau, est cultivé le riz, résilient à l'inondation (Figure 38).



Figure 38 : Vertisols aménagés et valorisés avec le maïs, le riz et le coton

En outre, 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, en toute évidence, 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). Mvondo Awono (1997) observe également au Canada, 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. En effet, les SCV assurent un contrôle satisfaisant des mauvaises herbes, notamment le redoutable *Striga sp.* Lorsqu'elles sont mal contrôlées, ces adventices causent des dépréciations ou des pertes en coton estimées à 35% pendant le premier mois après le semis (Déat, 1977). Ces pertes peuvent être dues à un effet direct de compétition pour les éléments nécessaires pour la croissance de la plante : eau, éléments minéraux, lumière, espace de développement (Longchamp, 1997 ; Barralis, 1977 ; Koch *et al.*, 1982). Ces pertes peuvent être aussi liées au parasitisme des espèces comme *Striga hermonthica*, *Striga asiatica*, *Striga gesnerioides* (FAO, 1993) qui occupent 40% des terres arables sub-sahariennes (Figure 39) et provoquent des pertes moyennes de 48% en production céréalière (Mboob, 1989).



Figure 39 : Parcelle de sorgho envahie par *Striga hermonthica*

En plus de la compétition et du parasitisme, on observe parfois le phénomène d'allélopathie entre les mauvaises herbes et les cultures à l'exemple du *Cyperus esculentus* qui a un effet dépressif sur le maïs et le soja (Drost et Doll, 1980) et les adventices peuvent servir d'hôtes secondaires, une cinquantaine de mauvaises herbes donnent refuge au ravageur du cotonnier *Bemisia tabaci* (Gameel, 1965) et le puceron du cotonnier *Aphis gossypii* est hébergé par plus de 302 espèces végétales dans la seule région du Nord Cameroun (Deguine, 1995). En outre, la présence des semences étrangères ou de débris végétaux peut réduire la qualité de la récolte et en diminuer la valeur commerciale (Orkwor, 1983) et dans les fibres de coton, les mauvaises herbes diminuent la valeur à la vente (SODECOTON, 1991).

Les bonnes performances en SCV ont été également observées par Tsozué *et al.* (2015) sur le rendement moyen du *Sorghum* de 2002 à 2012 sur le site expérimental de Zouana. 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* (Abou Abba, 2017). Ce qui illustre bien la performance des SCV notamment l'effet d'association aux légumineuses. Les SCV permettent par ailleurs de récupérer et de revaloriser les parcelles jadis rendues incultes à la production agricole du fait d'une dégradation sévère comme les *hardés* (Figure 40).



Figure 40 : Sol improductif à Zouana

Une étude menée sur l'utilisation du fumier comme fertilisant organique au Nord-Cameroun par la SODECOTON et le Projet ESA en 2008 a également montré des résultats satisfaisants : l'apport du fumier a permis de réduire de moitié la quantité d'engrais minéral. Ainsi, l'apport de 6 t/ha du fumier n'a été accompagné que 50 kg/ha de 22-10-15 au lieu de 100 kg/ha, pour une réduction de 36250 F du coût d'engrais sur le maïs, de 29000 F sur le coton et de 7250 F sur le sorgho pluvial avec un gain de rendement de 600 kg/ha en maïs, 250 kg/ha en coton et 400 kg/ha en sorgho pluvial. Ce qui conforte l'analyse de Pieri (1989) qui relève que le fumier apporte en moyenne au sol en azote : 1,18 et 1,41 méq /100 g ; en P_2O_5 : 0,74 et 0,69 méq /100 g et en K_2O : 1,83 et 1,47 méq /100 g ; respectivement au Mali et au Sénégal. Aussi, Roose (1992) trouve qu'en augmentant la biomasse au sol, on réduit le travail du sol de 45 000 CFA/ha/an, mais également les problèmes d'érosion. Ce qui cadre bien avec l'objectif de la Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES).

Ces atouts sont la réponse des sols aux effets d'amélioration liés à la matière organique et sa minéralisation, 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 (verses de terre, termites, bactéries, ...) qui assurent l'humification et la minéralisation de la matière organique ; et la hausse de la teneur en humus qui contribue à la stabilité structurale. Les producteurs qui utilisent les SCV ou même le fumier indiquent qu'ils réduisent le temps de jachère et revalorisent les sols dégradés et les sols incultes à l'agriculture. Le fumier combat au même titre que *Crotalaria juncea* une adventice redoutable en culture céréalière, le *Striga hermonthica*, mais favorise toutefois l'infestation des autres adventices lorsqu'il est peu décomposé (Bello *et al.*, 2004). Aussi, on peut observer que les rendements en grains de maïs obtenus à Kodek et à Zouana au Nord-Cameroun en culture pluviale, ne diffèrent que peu des rendements obtenus en maïsiculture irriguée, avec un dispositif d'irrigation performant (le pivot Toma) 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 (Dugué, 2009). Toutefois, la moyenne des rendements obtenus s'écarte 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, K₂O et P₂O₅), 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 le facteur limitant, déterminé par l'analyse des sols. 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 (UNIFA, 2005).

L'enfouissement superficiel des pailles de maïs après récolte est souvent conseillé pour accroître l'humification et la minéralisation de la matière organique mais cela ne doit concerner que de faibles quantités (2 t/ha). Il serait préférable de laisser en surface le plus de paille possible pour éviter l'enfouissement de grande quantité de C et donc une forte mobilisation d'azote du sol par les micro-organismes assurant la décomposition de ces résidus. Dans tous les cas, un compostage de ces pailles avec un enrichissement avec des déjections animales et si possible du phosphate aura toujours un effet plus important sur la fertilité du sol. La production d'un engrais vert n'est pas à exclure même si les agriculteurs subsahariens ont toujours été réticents à la pratiquer. Cet engrais vert peut s'intercaler entre la culture de maïs et les cultures de contre saison. Des plantes à forte densité de semis ou nécessitant peu de travail sont à rechercher (crotalaire par exemple). La biomasse ainsi produite est enfouie à l'état vert après 60 à 75 jours de végétation. Cette option n'est envisageable que dans les zones non inondées à cette période. En effet, l'utilisation des engrais minéraux à forte dose et de façon répétée peut entraîner à long terme une acidification du sol, surtout avec l'urée. Ce phénomène est encore peu développé du fait des faibles doses d'urée appliquées, de la présence de cultures non fertilisées dans la rotation et de la présence de parcs arborés dans les parcelles.

6.4 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 crotalaire (C) est de 196 kg N/ha (Figure 41). Ce qui signifie que les exsudats racinaires de la crotalaire auront apporté au sol une quantité de 40 kg N/ha, qui 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 %) étant excrété dans le milieu généralement sous forme d'exsudats d'acides aspartique ou glutamique, puis prélevé par la plante associée, dont le maïs dans la présente 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 196 kg N/ha au sol, mobilisés par le maïs pour sa croissance et son développement. La loi de restitution trouve donc ici toute son importance.

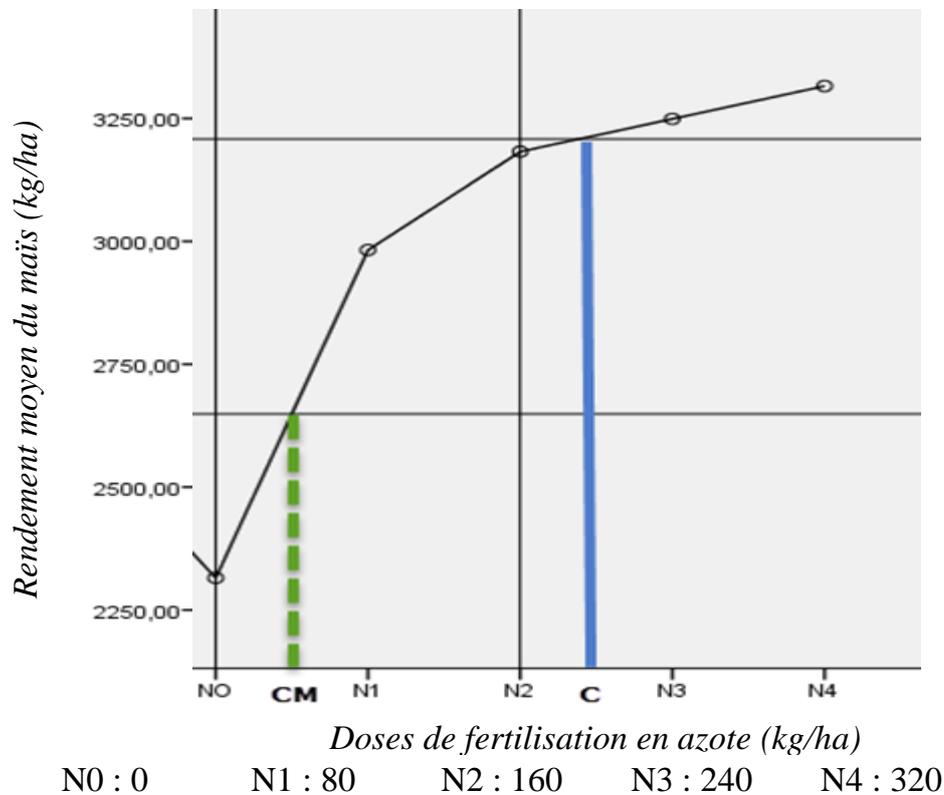


Figure 41 : Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Kodek

En effet, la minéralisation des résidus libère l'azote fixé par les légumineuses ou l'azote constituant la plante. La quantité d'azote libérée pour la culture suivante est alors fonction de la biomasse produite, du mode de destruction et du rapport C/N des résidus (souvent faible pour les légumineuses). Cependant, la dégradation de ces résidus étant assez rapide en cas de cultures associées de type colza-légumineuse, détruites en cours de cycle (sortie d'hiver), la culture de colza peut alors bénéficier en partie de l'azote minéralisé (Jamont, Piva and Fustec, 2013), in Solag (2016). Naudin (2012) observe pour les mêmes types de parcelles en rotation annuelle avec le riz dans la région du lac Alaotra à Madagascar, que la quantité d'azote dans les résidus varie et peut doubler avec le type de plante de couverture. Ainsi, il a obtenu 123 kg N/ha pour la *Dolichos lablab* contre 236 kg N/ha pour *Vicia villosa*. Ces valeurs de *Vicia villosa* sont plus élevées que celles observées par Sainju *et al.* (2006), qui varient de 76 à 167 kg N/ha selon les années. Ces auteurs ont 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 en biomasse du sorgho.

Pour la luzerne, la VRFA est estimée entre 100 et 125 kg N/ha dans le *Midwest* Américain (Bullock, 1992). Ce qui est un peu en deçà de la valeur d'azote fixée par cette plante fourragère, estimée par Bottomley et Myrold (2007) in Solag (2016), qui se situe entre 130 et 250 kg/ha/an ; leurs autres estimations sont de 60 à 115 kg/ha/an pour le soja, 50 à 100 pour le pois et 200 kg/ha/an pour le trèfle blanc. Dans le Michigan, Harris et Hesterman (1990) ont estimé, en utilisant la technique de traçage isotopique, que cette contribution de la luzerne n'est que 24 kg N/ha. Par la même technique, Chalk *et al.* (1993) ont observé que la contribution du lupin (*Lupinus angustifolius* L.) à l'orge (*Hordeum vulgare* L.) subséquent est de 34 kg N/ha. Harris et Hesterman (1990) avancent que la surestimation de la VRFA provient d'une part du fait qu'elle ne distingue pas l'effet d'azote des autres effets de rotation. De plus, la VRFA ne saurait expliquer les différences de prélèvement et par conséquent, de rendement entre monocultures et rotations culturales faisant intervenir des légumineuses (Mvondo Awono, 1997). Senaratne et Hardarson (1989) observent que le prélèvement d'azote par les céréales est plus élevé que celui des légumineuses lorsque des conditions favorables à la fixation symbiotique d'azote prévalent. Ce qui corrobore avec l'analyse de Solag (2016) mettant en exergue la règle de compétitivité pour l'azote : la céréale étant plus compétitive va utiliser l'azote du sol, la légumineuse va devoir fixer plus d'azote de l'air et au final en association, la céréale sera plus riche en protéine. La conservation de l'azote du sol par les légumineuses est aussi mentionnée par Chalk *et al.* (1993). Ces derniers expliquent que les légumineuses peuvent contribuer à l'azote du sol par la fixation symbiotique mais, qu'elles pourraient également prélever moins d'azote du sol et par conséquent, en laisser plus pour une culture subséquente puisqu'une partie de leurs besoins est satisfaite par la fixation d'azote atmosphérique. Ainsi, la VRFA ne fait pas de différence entre l'azote fixé biologiquement et l'effet de conservation d'azote du sol favorisé par les légumineuses. En effet, les racines de la crotalaire font un labour biologique en améliorant la structure du sol, mais aussi ramènent en surface les éléments nutritifs des plantes jadis stockés en profondeur du sol.

L'augmentation de la teneur d'azote sur *mulch* observée à Kodek et Zouana se justifie par la loi de la restauration ou de la restitution où les exportations des éléments minéraux doivent être compensées par des restitutions pour éviter l'épuisement des sols, et ainsi assurer leur durabilité et leur productivité. Pour les agronomes et les écologistes, les systèmes agricoles durables sont ceux dont la productivité ne varie pas avec le temps, et ne dégradent pas les autres écosystèmes (Deybe, 1994). Il faut donc restituer au sol les exportations des récoltes, des pertes par lessivage et les pertes incontrôlées. Cette loi de restitution semble insuffisante et discutable pour trois raisons : (i) de nombreux sols souffrent d'une pauvreté naturelle en un ou plusieurs éléments nutritifs et exigent d'être enrichis pour répondre à la définition de sol cultivé ; (ii) le sol est exposé à des pertes d'éléments fertilisants par lessivage vers la nappe souterraine ou par ruissellement et érosion vers les eaux de surface ; (iii) les plantes ont des besoins intenses en éléments nutritifs appelés « besoins instantanés » au cours de certaines périodes de leur cycle végétatif durant lesquelles les réserves mobilisables du sol peuvent être insuffisantes.

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 crotalaire (C) est de 184 kg N/ha (Figure 42). On note 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 aura 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. Toutefois, ces résultats se rapprochent peu de ceux obtenus 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 (Chaich, 2010). Par ailleurs en ce qui concerne le haricot, Danso et Eskew (1985) estiment que *Phaseolus vulgaris*, très répandu en

Amérique latine, est 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) est un excellent fixateur, avec 150 à 300 kg N/ha en Egypte et en Autriche.

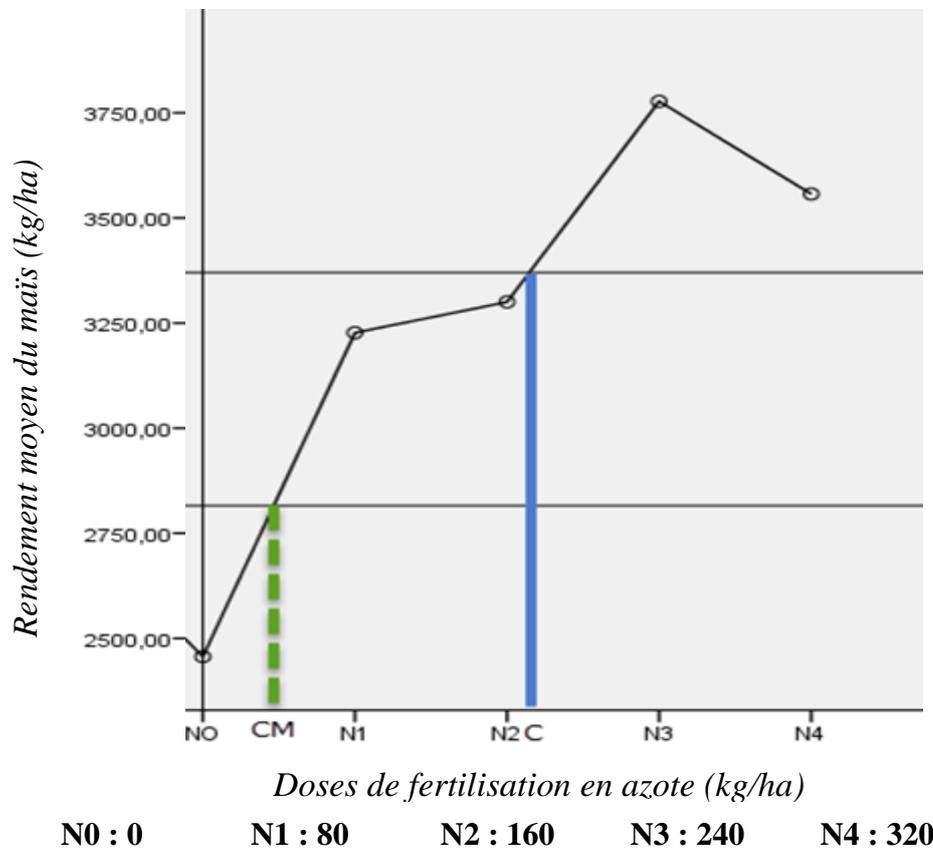


Figure 42 : Courbe de réponse du maïs à la fertilisation azotée à Zouana

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 ; ce qui correspond sur le plan économique à une désutilité marginale. 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 en effet 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 ».

On observe donc de manière globale que l'espèce *Crotalaria juncea* contribue à améliorer la fertilité des sols dégradés, bien que l'augmentation excessive des engrais (l'urée dans le présent cas) se traduise par la baisse des rendements due à la phytotoxicité. Et la loi de Mitscherlich ou loi de rendements décroissants (Figure 43) peut aussi justifier cette tendance à la phytotoxicité. Cette loi aussi appelée loi des excédents de rendements moins que proportionnels, traduit l'augmentation du rendement d'une plante en fonction de la teneur du milieu en un élément nutritif jusqu'au niveau de la toxicité. Cette loi montre également l'existence pour une culture déterminée sur un sol donné : un rendement maximum théorique et un rendement optimum économique, qui est le plus recommandé. En effet, au niveau du rendement optimum, le gain de rendement couvre la dépense supplémentaire en engrais, ce qui n'est pas le cas du rendement maximum.

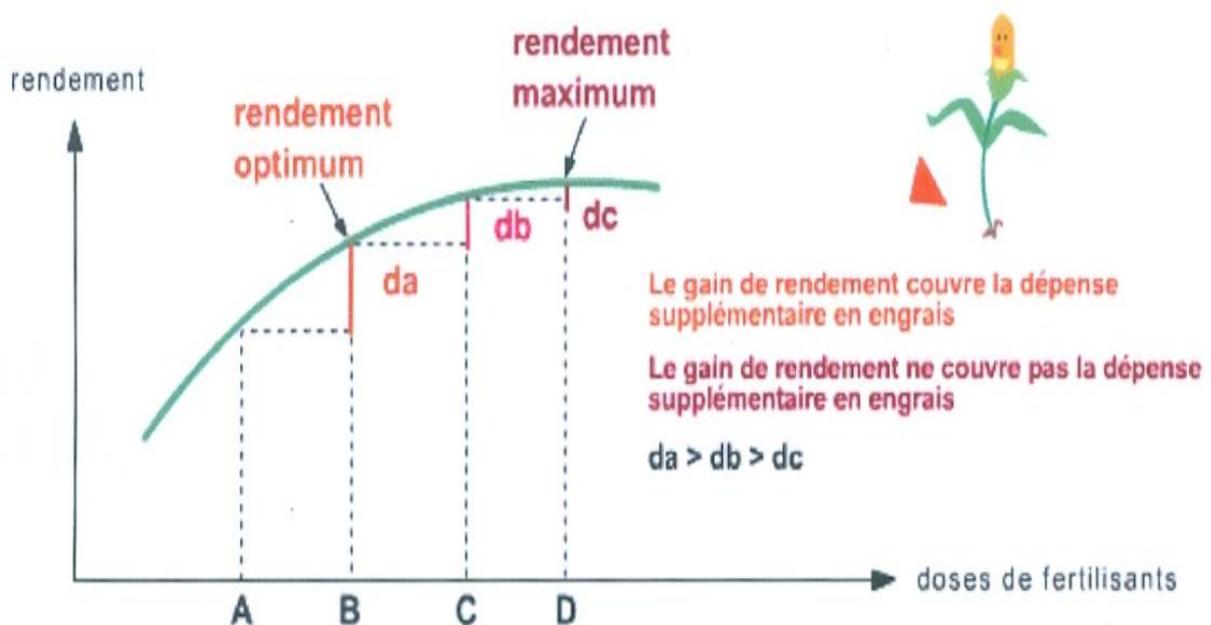


Figure 43 : Loi de Mitscherlich ou loi de rendements décroissants

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 (Figure 44). 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.

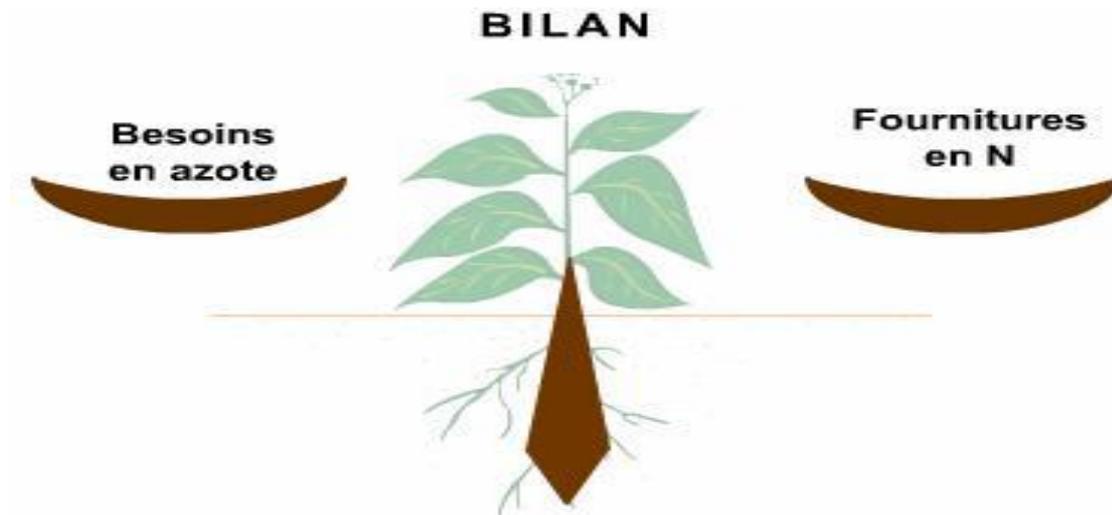


Figure 44 : Bilan des besoins et apports en azote d'une plante (UNIFA, 2005)

En effet, les manifestations de carence azotée chez le maïs varient selon l'intensité du déficit (Mvondo Awono, 1997). On observe en général un ralentissement de la croissance, une diminution des dimensions des feuilles, un amincissement des tiges et une réduction du nombre de tiges (Tucker, 1984). 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 (Epstein, 1972). La chlorose des plantes carencées en N 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 (Goodwin et Mercer, 1986). 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 (Plenet *et al.*, 1990). 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 (Lamaze *et al.*, 1990).

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 (Eaglesham *et al.*, 1982 ; Paré *et al.* 1992). Par exemple, l'incorporation de résidus de légumineuses après une récolte des graines (Senaratne et Hardarson, 1988 ; Paré *et al.*, 1992) ou après plusieurs coupes (Heichel, 1987 ; Sheaffer *et al.*, 1989) retourne au sol des quantités d'azote limitées. Chalk *et al.* (1993) observent que 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 (Huntington *et al.*, 1985 ; Sarrantonio et Scott, 1988). Cet azote ne contribue donc pas nécessairement à la nutrition de la culture suivant directement la légumineuse. Il peut plutôt participer à la contamination de l'environnement. Ainsi, l'apport d'azote au sol par les légumineuses n'expliquerait pas en totalité les rendements élevés des cultures subséquentes. D'autres effets comme la rotation, non liés à l'apport d'azote au sol, expliquent aussi les rendements supérieurs des céréales subséquentes aux légumineuses (Heichel, 1987; Russelle *et al.*, 1987). Ces effets de rotation incluent : l'amélioration des propriétés physiques, l'élimination des substances phytotoxiques du sol, l'addition de promoteurs de croissance et la réaction de l'incidence d'insectes nuisibles et des maladies (Mvondo Awono, 1997). De même, les pédologues et agronomes ont mis en évidence les dangers d'une fertilisation basée uniquement sur la fumure minérale pour les systèmes de culture continue pluviaux (Sédogo, 1993 ; Pieri, 1989) : (i) le risque d'acidification des sols (baisse du pH) et au stade ultime de dégradation avec l'apparition d'une toxicité aluminique pour les cultures ; (ii) la baisse continue du taux de matière organique du sol en deçà de ce qui est agronomiquement souhaitable (moins de 0,6% pour les sols sableux, moins de 0,8% pour les sols sablo-argileux). Cette baisse affecte l'état du complexe argilo-humique qui joue un rôle important dans la nutrition minérale des plantes, la valorisation des engrais minéraux, la structure et la capacité de rétention du sol, etc. Les producteurs savent bien que certaines cultures valorisent mieux la fumure organique que d'autres, en particulier le maïs et le cotonnier (Dugué, 2009).

Bertrand et Gigou (2000) estiment que l'utilisation des engrais minéraux à dose assez conséquente et de façon répétée ne pose pas à priori de problème de pollution mais surtout un problème de dégradation du statut organique des sols et à la longue de dégradation de la fertilité du sol. Pour compenser 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 (Sédogo, 1993) ou 6 t/ha tous les 3 ans (Belanger, 1996) 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.

6.5 Rendements du coton sur mulch de *Brachiaria ruziziensis*

Les données des rendements obtenus du coton en SCV sur mulch de *Brachiaria ruziziensis* et sur les témoins ont été récapitulées, représentant la moyenne des 5 producteurs par secteur cotonnier (Tableau 40).

Tableau 40 : Rendements coton SCV et témoin de 10 secteurs cotonniers

Secteur	Rendement témoin (kg/ha)	Rendement SCV (kg/ha)	Écart rendement en % SCV/témoin
Bogo	1316 ± 43	1356 ± 39	3,03%
Mokong	1446 ± 81	1276 ± 53	-11,75%
Mora	1447 ± 38	1956 ± 26	35,17%
Dogba	613 ± 45	1249 ± 46	103,75%
Koza	1412 ± 56	1572 ± 62	11,33%
Kaélé	1069 ± 43	1336 ± 37	24,97%
Dziguilao	997 ± 48	1695 ± 45	70,01%
Gobo	1503 ± 39	1251 ± 53	-16,76%
Dana	876 ± 46	930 ± 38	6,16%
Taala	441 ± 39	2233 ± 47	406,34%
Moyenne globale	1261,44 ± 58 ^b	1506,20 ± 67 ^a	19,43%

Variable	DDL	Carré moyen	F	Pr > F
Secteur	9	313385,35	1,66	0,1096
Système	1	1617491,56	8,56	0,0043

a et b présentent une différence significative au seuil de 5%

L'analyse des données de rendements sur le logiciel SAS ressort un coefficient de variation de 31,41% ; un rendement moyen par exploitant et par parcelle : 1383,82 kg/ha ; un rendement moyen sur SCV par exploitant 1506,20 kg/ha et un rendement moyen sur témoin par exploitant de 1261,44 kg/ha. Il ressort ainsi qu'en milieu paysan, le rendement moyen des parcelles en SCV est plus important que celui du système classique ou conventionnel soit un gain global en valeur relative de 19,43% avec le SCV comparé au témoin. La différence de rendement d'un secteur à un autre n'est pas significative ($P = 0,1096$) au seuil de 5%. Cependant au même seuil, la différence de rendement de coton est hautement significative entre le témoin et le SCV.

Les résultats ainsi obtenus se rapprochent des résultats en coton du Projet ESA (2003) sur le site expérimental de Zouana, donc 1222 kg/ha en SCV et 1033 kg/ha sur parcelle labourée avec le même niveau de fertilisation, soit un gain de 18,29%. Une différence significative ($P < 0,05$) entre les rendements du coton sur SCV et sur témoin a été également observée par Krishna et Oumarou (2003) en milieu contrôlé ; les rendements moyens étaient donc de 1185 kg/ha sur SCV et 835 kg/ha sur témoin, avec un gain de 350 kg/ha, soit 41,92%. Adoum *et al.* (2011) ont aussi trouvé en milieu paysan un rendement en coton de 1318 kg/ha sur SCV contre 1190 kg/ha, soit 10,76% en faveur des SCV. Des résultats analogues ont été rapportés par Jourdain et Scopel (2000) au Mexique. Krishna et Oumarou (2003) observent également des performances en poids moyen capsulaire du coton (4,82 g sur SCV contre 4,6 g sur témoin), en nombres de capsules par pied de cotonnier (5,09 contre 4,33), en nombre de capsules à l'hectare (237167 contre 215833), en nombre de pieds de cotonniers à l'hectare à la récolte (53873 contre 49584), en nombre de poquets à l'hectare à la récolte (30435 contre 29258), quand bien même le nombre de pieds par poquet à la récolte est légèrement plus important sur témoin que sur SCV (1,76 sur SCV contre 1,78 sur témoin). Ils trouvent ainsi que le rendement est mieux corrélé au nombre de capsules par pied ($r = 0,67$) qu'au nombre de pieds par hectare ($r = 0,37$).

Globalement, les effets de cette performance des SCV par rapport au témoin se justifient par une combinaison de plusieurs facteurs dont : (i) une bonne maîtrise des adventices par la biomasse (Figure 45), notamment le contrôle du *Striga hermonthica*. Ceci se justifie d'autant plus que la décomposition de la matière organique présente au niveau

du sol un effet inhibitif sur le développement de certaines adventices dont le *Striga*, effet aussi observé par Randrianjafizanaka (2010) à Madagascar. Krishna et Oumarou (2004) notent d'une manière générale que l'enherbement est inférieur sur la partie SCV par rapport au témoin, sauf entre 30 et 40 jours après levée du cotonnier, où il devient équivalent ;



Figure 45 : Effet de maîtrise de l'enherbement par les SCV sur coton

(ii) une meilleure infiltration de l'eau, ce qui limite l'érosion due au ruissellement, modalité avantageuse des SCV observée également par Krishna et Oumarou (2004), dans l'efficacité de maîtrise et d'optimisation de l'eau de pluie par les cultures dans une zone connue de faible pluviométrie, le paillage limite par ailleurs l'évaporation ; (iii) le développement des microorganismes et de la macrofaune du sol, lesquels contribuent à l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol ; (iv) l'amélioration de la teneur en minéraux et de la fixation par le complexe argilo-humique des bases échangeables (Mg, K, Na, Ca), exposées au lessivage et au ruissellement en l'absence dudit complexe. En effet, un sol pauvre en cations Mg^{2+} , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , est un sol peu fertile et acide, car ces cations qui rendaient le milieu électriquement neutre ont été prélevés par les plantes ou ont subi le lessivage ou le ruissellement. Raunet et Séguy (2006) observent que le SCV est une technique appropriée pour améliorer les rendements grâce à la décomposition des résidus des végétaux.

En ce qui concerne la rotation biennale recommandée en SCV, les cultures semées sans labour et dans le mulch de couverture au Nord-Cameroun, en premier lieu le cotonnier, représentent moins de 15% des surfaces en cultures associées de l'année précédente. Cette perte importante de surface en SCV est due aux difficultés des agriculteurs à maintenir sur les champs les couvertures végétales (Olina *et al.*, 2014), lesquelles sont très souvent consommées par le bétail durant toute la saison sèche ou même détruites par des feux (Njomaha *et al.*, 2010). En outre, Dugué *et al.*, (2012) notent globalement que l'intensification de la production par l'utilisation des intrants et d'équipements est bien mieux appréciée des producteurs au Nord-Cameroun que l'intensification écologique des systèmes de production. Bien que connus des structures de développement agricole comme la SODECOTON, ces modèles agroécologiques de production ont rarement été adoptés à grande échelle.

Toutefois, certains agriculteurs se sont bien appropriés de ces techniques agroécologiques du fait de leurs atouts. Ainsi, les contraintes et les cas de contre-performances observés en milieu paysan sur le SCV n'arrivent pas à éroser la détermination de ces producteurs convaincus par ces systèmes ; car près de 24% ont d'ailleurs répliqué sur leurs nouvelles parcelles les itinéraires SCV sans encadrement technique (Adoum *et al.*, 2006b). On observe par ailleurs des écarts négatifs de -11,75% et -16,76% en rendements du coton en SCV et sur témoin, comparés chez les agriculteurs respectivement dans les secteurs de Mokong et de Gobo. Ce qui est lié à la faible implication ou la non adhésion de certains producteurs à ce package technologique, producteurs qui ont du mal à se projeter en dehors de l'agriculture conventionnelle (Hinimbio, 2014). Cette dimension d'analyse a aussi été constatée par Seignobos (2011) au Nord-Cameroun. Ce qui peut aussi s'expliquer par le non-respect des recommandations techniques qui se traduit par le fort enherbement des parcelles, la faible densité de semis et le semis tardif des cultures et parfois même l'insuffisance des intrants et du matériel agricole adéquat (appareil à cache pour le traitement). Le mauvais contrôle des mauvaises herbes en période de semis et pendant le développement de la culture se traduit par leur importante infestation et ce type de parcelles est généralement abandonné (Figure 46).



Figure 46 : Parcelle SCV en coton abandonnée (Hinimbio, 2014)

D'autres contraintes ne favorisent pas une bonne expansion des SCV. Il s'agit en plus de la location des terres, la vaine pâture assez récurrente dans la zone, les feux de brousse qui consomment souvent la biomasse pourtant conservée. Ce qu'a par ailleurs relevé Horus Entreprises (2009). On peut aussi citer les difficultés d'approvisionnement en intrants, en matériels adéquats et même les conditions pédoclimatiques parfois défavorables (irrégularité des pluies, inondations, ...). Au vu de ces contraintes, les actions d'appui par l'Etat et de concertation entre les différents acteurs sont importantes à mener pour assurer une gestion raisonnée et durable des ressources agropastorales.

6.6 Apports économiques du SCV

La marge bénéficiaire brute ou valeur ajoutée nette (VAN) a été calculée sur la base de la valeur du produit brut obtenu à laquelle est soustraite la valeur des consommations intermédiaires (les équipements et leur amortissement n'étant pas pris en compte dans ces agrosystèmes). On observe aussi bien à Kodek qu'à Zouana que la VAN de C > CM > N0 > Différents niveaux de fertilisation à l'urée (Tableau 41). Par rapport à la VAN du témoin N0 à Kodek (131300 F CFA), la VAN de CM est de 173900 F CFA et celle de C est 234200 F CFA, soit un gain respectif de 32% et 78 % par rapport à N0. A Zouana, la VAN de N0 est 143969 F CFA, de CM est 187853 F CFA et de C est 243680 F C CFA, soit un gain respectif de 30% et 69 % par rapport à N0. A partir de N3 (240 Kg/ha N), les rendements décroissent, dus à l'effet de phytotoxicité. N4 (320 kg/ha N) a un revenu négatif soit - 59259 F CFA à Kodek et - 42636 F CFA à Zouana et ne

présente donc pas un intérêt économique, justifié par la loi des rendements décroissants du chimiste minéralogiste Allemand Mitscherlich. Ce qui signifie qu'à partir de la dose de fertilisation de 320 kg/ha d'azote sur le maïs, le gain de rendement ne couvre pas la dépense supplémentaire en engrais. Bien que très rare au Nord-Cameroun, la vente des semences de crotalaire peut aussi générer des revenus. Ainsi, avec un rendement moyen de 2000 kg/ha de semences et un prix de cession moyen de 200 FCFA/kg, cette essence peut produire un revenu brut de 400000 FCFA/ha. Les semences du cultivar '*Tropic Sun*' produit à Hawaii, en Amérique du Sud et en Afrique du Sud ont un coût entre \$1.55 et \$2.75 le pound. La biomasse utilisée en *mulch* contribue donc à limiter le coût de production. Avec une production suffisante de biomasse, on réduit la quantité et donc le coût d'engrais ainsi que la quantité et le coût d'herbicides ou de nématicides pour la protection phytosanitaire (Treadwell et Alligood, 2013). Ce coût est également réduit de par la réduction du nombre de sarclages car l'enherbement est maîtrisé par le couvert végétal. On gagne de ce fait en temps de travaux culturaux avec la possibilité d'augmenter la taille de l'exploitation.

Tableau 41 : Estimation de la valeur ajoutée nette d'un ha de maïs

Charges/Revenus	C	CM	NO	N1	N2	N3	N4
Consommations intermédiaires (FCFA/ha)							
<i>Semences</i>	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
<i>Herbicides</i>	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
<i>Urée</i>	0	0	0	69565	139130	208694	278259
Opérations culturales (FCFA/ha)							
<i>Défrichage</i>	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
<i>1er passage herbicide</i>	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
<i>Labour</i>	0	0	0	0	0	0	0
<i>Semis</i>	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
<i>1^{er} sarclage manuel</i>	0	10000	10000	10000	10000	10000	10000
<i>Epannage engrais</i>	0	0	0	10000	10000	10000	10000
<i>2^e sarclage manuel</i>	5000	0	10000	10000	10000	10000	10000
<i>Récolte</i>	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000
Total charges	85000	90000	100000	179565	249130	318694	388259
Prix (FCFA/ha)	100	100	100	100	100	100	100
Rendement Kodek (kg/ha)	3192	2639	2313	2964	3160	3225	3290
Rendement Zouana	3287	2779	2440	3151	3219	3660	3456
Revenu brut Kodek	319200	263900	231300	296400	316000	322500	329000
Revenu brut Zouana	328680	277853	243969	315127	321903	365953	345623
VAN Kodek (FCFA/ha)	234200	173900	131300	116835	66870	3806	-59259
% Gain/N0	78%	32%	0%	-11%	-49%	-97%	-145%
VAN Zouana (FCFA/ha)	243680	187853	143969	135562	72773	47259	-42636
% Gain/N0	69%	30%	0%	-6%	-49%	-67%	-130%

NO : 0 N1 : 80 N2 : 160 N3 : 240 N4 : 320 (kg/ha N)

Pour le cas du coton en milieu paysan, la culture en SCV a permis d'obtenir, un revenu net de 228090 F/ha par rapport au coton conventionnel qui n'a généré que 109165 F/ha, soit un écart de 108,94% en faveur du SCV (Tableau 42). Cette rentabilité attractive du SCV se justifie par son rendement élevé et l'absence des opérations de labour, de sarclage et de buttage. Aussi, la réduction du lessivage de la fumure minérale fait valoriser les engrais apportés, grâce à la fixation des éléments nutritifs de la plante sur le complexe argilo-humique. Ce qui diminue la dose d'engrais à appliquer et cette réduction d'engrais peut aller jusqu'à la moitié de la dose recommandée : le SCV contribue donc à diminuer le coût de production (CIRAD, 2008b), avec réduction des éventuels effets de pollution.

Tableau 42 : Estimation de la valeur ajoutée nette d'un ha de coton

Charges/Revenus	Système conventionnel (F)	SCV (F)
Consommations intermédiaires (FCFA/ha)		
<i>Semences</i>	10000	10000
<i>Herbicides</i>	5000	5000
<i>Engrais NPK</i>	60000	60000
<i>Insecticides</i>	5000	5000
Opérations culturales (FCFA/ha)		
<i>Défrichage</i>	10000	10000
<i>1^{er} passage herbicide</i>	5000	5000
<i>Labour</i>	20000	0
<i>Semis</i>	10000	10000
<i>2^e passage herbicide</i>	5000	5000
<i>1^{er} sarclage manuel</i>	12000	0
<i>Epannage engrais</i>	8000	8000
<i>2^e sarclage manuel</i>	10000	0
<i>Buttage</i>	10000	0
<i>Sarclage après buttage</i>	7000	0
<i>Traitement insecticide</i>	10000	10000
<i>Récolte</i>	25000	30000
<i>Bâchage</i>	5000	5000
<i>Coupe vieux cotonniers</i>	8000	8000
Total charges (A)	225000	171000
Rendement (kg/ha)	1261	1506
Prix de vente (FCFA/kg)	265	265
Revenu brut (B)	334165	399090
Valeur ajoutée nette (B) – (A)	109165	228090

La diminution du temps de travail découle selon Krishna et Oumarou (2004) d'une réduction du nombre et de la durée des sarclages, et la suppression du buttage ; ainsi, la durée des désherbages diminue de 30 à 100%. Olina (2010) indique que la mise en place des cultures varie de 0,7 hj/ha à 1,6 hj/ha sur semis direct contre 4 à 5 hj/ha sur labour. Ce gain de temps sur semis direct peut varier de 60 à 80 % selon les cultures. Cet auteur relève par ailleurs que la productivité du travail et le revenu familial sont supérieurs dans les exploitations en semis direct par rapport au labour. La simulation montre qu'en combinant une lutte chimique modérée avec un sarclage précoce en traction animale, on peut obtenir une marge brute acceptable sur semis direct avec herbicides pour les cultures du coton, du maïs et d'arachide. Globalement comme temps des travaux moyens, Olina (2010) a obtenu à Mafa Kilda 78,8 hj/ha sur semis direct avec herbicides et 86,3 hj/ha sur labour sur la culture du maïs et 139,3hj/ha sur semis direct avec herbicides et 155,8 hj/ha sur labour sur le coton.

Bien que agronomiquement et économiquement performant, certaines contraintes sont parfois observées dans le développement des SCV notamment le problème de conservation de la phytomasse exposée aux feux de brousse et aux dégâts d'animaux ; l'insécurité foncière ; la faible appropriation des techniques SCV mais aussi le non-respect des itinéraires techniques recommandées. Ce qui devrait faire l'objet d'une attention plus soutenue des différents acteurs engagés dans la promotion de ce système et le renforcement des capacités des producteurs en matière de SCV. Une politique gouvernementale avec des appuis multiformes soutenus en faveur de l'agriculture est aussi tout indiquée. Madi (1994) relève d'ailleurs que les exploitations paysannes au Nord-Cameroun peuvent amorcer une phase de croissance à condition que les pouvoirs publics s'impliquent véritablement dans la politique agricole et arrivent à maîtriser les phénomènes inflationnistes.

Ramahatoraka *et al.*, (2011) ont en effet constaté que 26% des exploitants ayant moins de 5 ans d'adoption des SCV expriment encore des besoins de conseil soit sur la pratique des itinéraires en SCV, soit sur le choix et l'utilisation des intrants (engrais et produits phytosanitaires), ils sont aussi demandeurs d'un suivi plus rapproché des parcelles. Ces chercheurs observent par ailleurs avec satisfaction que presque les 77% des semences

de plantes de couverture utilisées par les paysans sont autoproduites. Ce qui est d'ailleurs à encourager dans le souci d'appropriation et de pérennisation des SCV, mais la qualité et la pureté de ces semences doivent être contrôlées par un service compétent pour optimiser les revenus. Ils relèvent en outre que quel que soit le type d'exploitation et le type de systèmes de culture, la quantité moyenne d'engrais utilisée par les exploitations est toujours inférieure à la recommandation indiquée par les opérateurs techniques (Figure 47). Les doses de NPK varient de 15 à 112 kg/ha, celle de l'urée de 4 à 146 kg/ha pour une recommandation respectivement de l'ordre de 300 kg/ha et 50 à 100kg/ha dans la zone du Lac Alaotra. Ainsi, l'urée joue un rôle de fumure d'entretien dans les systèmes en SCV ayant comme culture principale le riz alors que le NPK contribue comme complément d'éléments mobilisables directement par les plantes après la mise en place. Bien que les systèmes SCV soient des systèmes améliorants la structure du sol, ils nécessitent durant les premières années d'adoption, l'utilisation d'une certaine quantité d'engrais qui décroît au fur et à mesure que les parcelles se pérennisent.

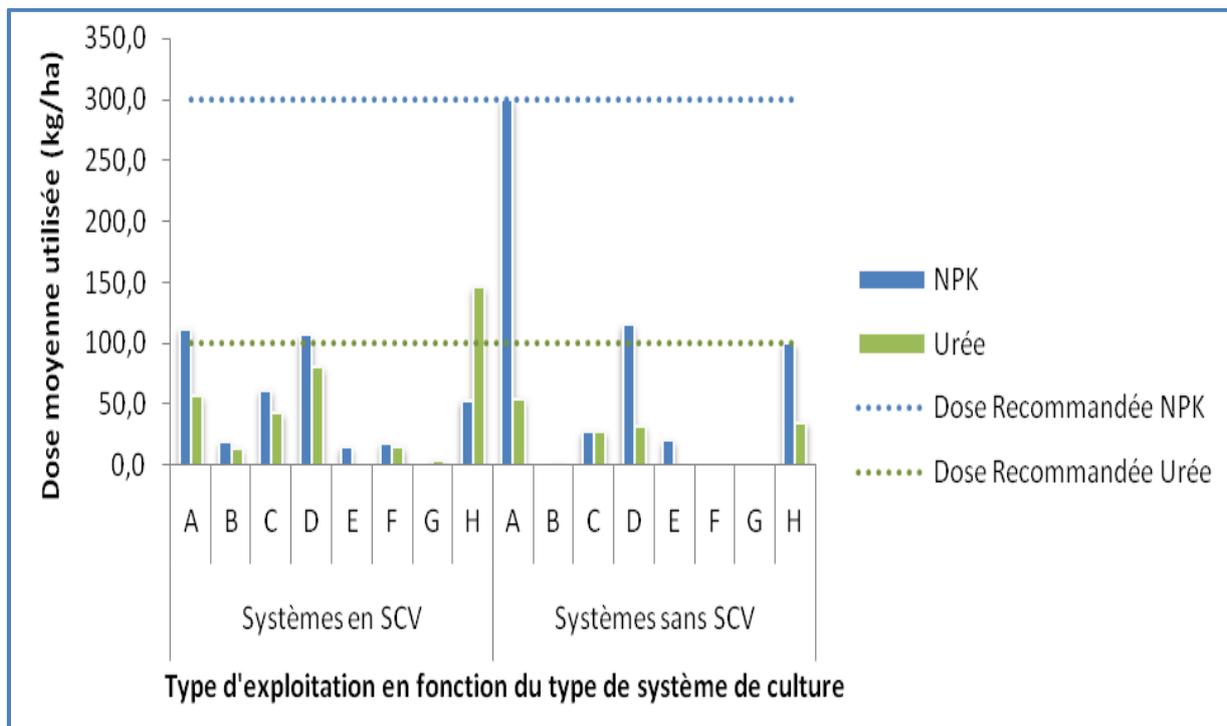


Figure 47 : Variation de la dose d'engrais chimiques en SCV ou non (Ramahatoraka *et al.*, 2011)

L'organisation des producteurs en faveur de la promotion des SCV est une option stratégique majeure pour accroître l'adoption et la durabilité de ces systèmes, à l'exemple du comité SCV installé dans certains villages du Nord-Cameroun en 2010. Les différentes structures paysannes existantes jouent un rôle important dans la pérennisation des systèmes SCV, indiquent Ramahatoraka *et al.*, (2011). Néanmoins, le fonctionnement de ces structures dépend de différents facteurs qui sont internes ou externes à l'entité. Et l'analyse ou la matrice SWOT dont l'acronyme anglais est *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*, permet de réaliser un meilleur diagnostic des forces, des faiblesses, des opportunités et des menaces de ces structures pour les rendre plus performantes en SCV, à partir des stratégies économiques envisageables. Dans ce sillage, il est aussi important d'assurer la sécurisation foncière afin de promouvoir les techniques agroécologiques performantes et rentables. La sécurisation foncière est importante pour le développement agricole et permet de favoriser l'adoption des SCV, avec leurs fonctions de régénération et de protection du sol (Ramahatoraka *et al.*, 2011). La gestion participative des ressources naturelles donc des sols est donc hautement conseillée et la FAO (2004) trouve que ce type de gestion constitue encore un défi de taille. Pour que cette cogestion soit efficace, elle propose un outil d'analyse et d'identification des acteurs combinant le diagnostic, la planification et le suivi-évaluation appelé 4R (*Responsabilities, Rights, Returns, Relationship*). Wybrecht et Lavigne-Deville (2002) estiment d'ailleurs que le diagnostic, jugement porté sur une situation à partir de l'analyse d'indicateurs ou de paramètres, est un outil important de développement local, à travers une identification des facteurs défavorables (à l'instar des contraintes à la promotion des SCV) et une proposition des actions de correction. En effet, beaucoup de locataires terriens se sont vu éconduire des parcelles louées lorsqu'elles ont été rendues productives du fait soit des pratiques SCV soit de l'application du fumier. Ce qui appelle à une formalisation des contrats de location des terres, sur une période de cinq ans au moins ; surtout dans un contexte où 9% des surfaces agricoles exploitées au Nord-Cameroun sont louées, contre les autres modes d'accès à la terre dont 56% par droit de hache, 20% par succession, 9% par don, 3% par prêt et 3% par achat (Adoum *et al.*, 2007).

Conclusion générale

La présente thèse est une contribution scientifique à la gestion durable du patrimoine sol, exposé à la dégradation, dans une démarche de recherche-action, où les résultats d'analyse servent à nourrir les solutions opérationnelles en agronomie. Au terme de cette étude sur la réhabilitation agroécologique de la fertilité des sols à travers l'agriculture de conservation, on observe que le système de culture sur couverture végétale (SCV) apporte une réponse particulièrement bien adaptée aux zones à écologie fragile, soumises à des sévères risques de dégradation des terres. Cette dégradation affecte la fertilité et la biodiversité des sols avec une implication directe sur la baisse des rendements des cultures, l'insécurité alimentaire et la pauvreté. Ainsi, 86% des agriculteurs en zone cotonnière de l'Extrême-Nord du Cameroun estiment leurs rendements agricoles en baisse et une baisse de 44,16% a été observée entre 1992 et 2012 sur le rendement du coton à Kaélé. Milieu vivant dont la formation est très lente, le sol est donc une ressource limitée qu'il convient de protéger contre la dégradation. Et la présente étude a permis en milieu contrôlé de ressortir la contribution de la légumineuse *Crotalaria juncea* dans la réhabilitation agroécologique des sols dégradés ; ceci à travers la réponse du maïs cultivé en SCV et en système classique dans les sites expérimentaux de Kodek et de Zouana.

On constate donc sur ces deux sites que les sols sont sablo-limoneux à 20 cm du sol et la proportion des éléments grossiers est faible à Kodek (12,90%) mais plus grande à Zouana (42,03%). Le sol couvert par la crotalaire connaît une hausse de teneur en matière organique bien que celle-ci reste faible par rapport à l'idéal de 5% (entre 1,38 et 2,09% à Kodek et 1,67 et 2,24% à Zouana). Les groupes taxonomiques de la pédofaune du sol en SCV sont plus importants comparés au système conventionnel et l'activité biologique liée essentiellement aux termites et vers de terre y est plus intensive. L'exploration des horizons du sol par les racines de la crotalaire, combinée à l'activité biologique permettent de casser les croûtes de battance et semelles de labour pour rendre le sol perméable, faciliter l'infiltration et éviter l'engorgement et l'inondation. L'accroissement de la teneur en matière organique du sol est mieux observé en SCV et nécessaire à une vie biologique efficace et à une biodiversité fonctionnelle. La matière organique est de loin le meilleur artisan de la stabilité structurale du sol et favorise l'amélioration de la capacité de rétention en eau et en éléments minéraux, avec effet de

minoration du stress hydrique sur les plantes, 1g de celle-ci pouvant retenir 100 g d'eau. Elle limite par ailleurs les phénomènes d'acidification du sol souvent observés au Nord-Cameroun. Le rapport C/N, indicateur de la minéralisation de la matière organique, varie de 13,30 à 30,31 à Kodek et de 16,00 à 24,75 à Zouana. En effet, ces valeurs C/N étant supérieures à 12, la quantité d'azote est donc faible dans les sols échantillonnés.

La CEC à pH7 est globalement faible et varie de 9,12 à 13,3 méq/100 g à Kodek et de 7,6 à 12,18 méq/100g à Zouana. Aussi, seuls 85% de plants de crotalaire observés à Kodek et 75% à Zouana ont des nodosités, avec respectivement 6,71 et 5,60 nodosités/plant et 61,96% et 51,22% de nodosités efficaces à leghémoglobine. On observe par ailleurs que cette légumineuse, avec une taille moyenne de 1,81 et 2,41 m ; une densité moyenne de 165503 et 170601 plants/ha ; produit en moyenne sans fertilisation une biomasse sèche totale de 19,03 et 15,74 tonnes/ha respectivement à Kodek et à Zouana. Ce qui est très largement au-dessus de la recommandation de 6 tonnes/ha de biomasse sèche en SCV.

La valeur moyenne de remplacement en fertilisant azoté pour les exsudats racinaires issus du traitement crotalaire-maïs (CM) est de 40 kg N/ha et 38 kg N/ha ; et celle obtenue sur le *mulch* de crotalaire (C) après minéralisation partielle est de 196 kg N/ha et 184 kg N/ha respectivement aux sites de Kodek et Zouana. Ce qui illustre bien que l'espèce *Crotalaria juncea* contribue aussi bien en association qu'en *mulch* à apporter aux sols de l'azote (à travers les exsudats ou la minéralisation de la matière organique) pour la nutrition minérale des cultures. La symbiose *Rhizobium-Crotalaria* permet donc de fixer en moyenne 266,67 kg N/ha/an à Kodek et 253,33 kg N/ha/an 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 bioressource 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 ; 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 ; mais aussi 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.

Aussi en milieu paysan, un gain global en rendement coton de 19,43% est obtenu par rapport au système conventionnel, soit 1506 kg/ha sur SCV contre 1261 kg/ha sur témoin. L'économie d'engrais azotés obtenue de l'usage de la crotalaire ou même du mulch de *Brachiaria ruziziensis*, permet de baisser le coût de production de la culture, mais également de protéger l'environnement en limitant la pollution éventuelle des sols par les nitrates, faiblement retenus sur le complexe argilo-humique. A ce titre, les plantes de couverture sont véritablement une source de matière organique et d'éléments minéraux au sol et assurent la lutte contre l'érosion, avec un intérêt aussi bien agronomique qu'économique. Avec l'absence du labour, du sarclage, du buttage et avec la réduction de la dose d'engrais, ce système assure une diminution du coût de production et du temps de travail. Ainsi, dans un concept de « innover pour durer », le SCV se positionne comme étant une technique innovante garantissant une production agricole optimale, durable, à coût raisonnable, avec réduction de l'érosion. Il améliore le statut organique, minéral, biologique et hydrique du sol et s'illustre donc comme un système alliant une bonne performance écologique, agronomique et économique.

De ce qui précède, l'agriculture de conservation à base de la crotalaire ou du *Brachiaria ruziziensis* est un système bien indiqué pour inverser la tendance à la dégradation des sols et contribue ainsi à améliorer la productivité agricole. Elle offre donc une innovation agronomique et une protection de l'environnement et est une véritable révolution vers une agriculture optimale et durable. A travers l'agriculture de conservation, les exploitations paysannes au Nord-Cameroun peuvent amorcer une phase de croissance mais à condition que les pouvoirs publics les accompagnent véritablement dans la politique agricole avec des appuis financiers, matériels et techniques conséquents afin de limiter les coûts des facteurs de production (matériel agricole, engrais, semences, etc.). Pour ainsi consolider les acquis des SCV dans les exploitations et susciter davantage l'attention et l'adhésion des agriculteurs, il est nécessaire de développer la concertation entre les différents acteurs (autorités administratives et traditionnelles, élus, techniciens et exploitants des ressources naturelles). Cette concertation, processus collectif de négociation, de définition des règles, de légitimation des actes, s'articulera autour de la gestion et de la sécurisation du foncier mais aussi autour des usages concurrentiels d'autres ressources naturelles

agricoles et pastorales (eau, cultures, végétation naturelle, ...). Des contraintes telles que l'insécurité foncière, la vaine pâture, les feux de brousse, le problème de conservation de la biomasse, le changement climatique, etc., peuvent y trouver facilement solutions. Et les règles consensuelles issues de cette concertation doivent donc commander une attitude agroécologique d'ailleurs à recommander en l'occurrence la limitation du brûlis des résidus culturaux, la promotion de la rotation avec les légumineuses dont *Crotalaria juncea*, la minoration de l'usage des engrais minéraux et pesticides, le respect de l'itinéraire technique de production des SCV et le développement des cultures fourragères pour limiter la pression sur la biomasse du sol à conserver.

Par ailleurs, il est important d'envisager en SCV un plan de fertilisation raisonnée, avec une fumure minérale réduite et une fumure organique conséquente (SCV ou amendements organiques) à l'effet de conserver la fertilité des sols : ce qui réfère à la gestion intégrée de la fertilité des sols, laquelle prend aussi en compte l'intégration des légumineuses fixatrices d'azote et des mesures de conservation des sols et des eaux. Ce plan consiste en effet à prévoir l'ensemble des apports d'engrais minéraux et organiques à doses raisonnées exempts de pollution ; avec le regroupement des parcelles en zone de même potentialité à travers une cartographie agrologique. Un bilan périodique des entrées et sorties pour les éléments majeurs N, P₂O₅, K₂O, MgO, CaO peut être effectué pour déterminer si les parcelles sont en régime d'entretien, d'enrichissement ou d'appauvrissement. Un contrôle assez régulier par des analyses de sol permet de confirmer le sens du bilan et de décider des mesures correctives.

Aussi à l'issue de cette thèse, il est recommandable en plus de la concertation permanente entre les acteurs, la création d'un programme de surveillance des sols à l'image de celui de la France coordonné par l'INRA. Le rythme de dégradation des sols étant supérieur à la pédogenèse, il est aussi important d'élaborer un cadre réglementaire ou une loi assurant la protection et la gestion des sols comme c'est le cas du Groupement d'intérêt scientifique sol (GIS Sol) créé en 2001 en France. Toutes les recommandations sus-évoquées visent incontestablement un ultime but, celui d'assurer une productivité agricole optimale, satisfaisante, rentable, durable, respectueuse de l'environnement et garante du bien-être, ayant ainsi éconduit l'insécurité alimentaire et la pauvreté.

On peut toutefois reconnaître à cette analyse relative aux SCV des limites pouvant être exploitées comme opportunités d'étude. Il s'agit, au-delà de l'analyse biophysique et agronomique, objet de cette thèse, l'approfondissement de l'évaluation économique de la réhabilitation agroécologique notamment l'analyse de la durabilité et la modélisation des agrosystèmes à base de *Crotalaria juncea* et d'autres plantes de couverture. De même, une analyse sur la variation de la densité et du niveau optimal de fertilisation des plants de cette légumineuse permettrait de recommander une densité optimale et une fertilisation organique et minérale adéquate (N-P-K) aussi bien en monoculture et qu'en association, diffusables auprès des agriculteurs ou entrepreneurs agropastoraux. Par ailleurs, une analyse en milieu paysan du SCV à base de la crotalaire permettrait également d'évaluer la performance de ce système en milieu réel de production.

Références bibliographiques

AABNF, 1990. *Biological Nitrogen Fixation and Sustainability of Tropical Agriculture*, Editors : Mulongoy K., Gueye M. and Spencer D.S.C., 488 p.

Abdul-Baki A., Bryan H. H., Zinati G. M., Klassen W., Codallo M., and Heckert N., 2001. *Biomass yield and flower production in sunn hemp: effect of cutting the main stem*, Journal of Vegetation and Crop Production, 7: 83-104.

Abou Abba A., 2017. *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, 35 p.

ACTA, 1996. *Index phytosanitaire*, 32^{ème} édition. Paris Cedex, France, 575 p.

Adoum Y. et Hinimbio T.P., 2012. *Plantation d'arbres et leur taux de survie*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 9.

Adoum Y., Hinimbio T.P., Adoum O., 2011. *Évaluation des rendements du coton SCV et du coton conventionnel en milieu paysan*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 9.

Adoum Y., Hinimbio T.P., Mohamadou M., 2008. *Charrette subventionnée et fumure organique*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 4.

Adoum Y., Hinimbio T.P., Mohamadou M., 2007. *Annuaire Statistique, Résultats de l'Enquête Agricole Permanente*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 20.

Adoum Y., Hinimbio T.P., Mohamadou M., 2006a. *Utilisation des revenus et gestion des intrants agricoles par les exploitations agricoles*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 3.

Adoum Y., Hinimbio T.P., Mohamadou M., 2006b. *Les techniques SCV en milieu paysan: appréciations des paysans expérimentateurs et contexte d'appropriation*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, 10 p.

Adoum Y. et Hinimbio T.P., 2005. *Annuaire Statistique, Résultats de l'Enquête Agricole Permanente*, CSE, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 22.

AEE, 1995. *L'environnement de l'Europe, l'évaluation sur les sols*, 15 p.

AFD, 2006. *Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) : une solution alternative aux systèmes de culture conventionnels dans les pays du Sud*, Agropolis production 1^{ère} édition, Paris, p 64.

AFES, 2008. *Les sols pour l'avenir de la planète Terre*, 16 p.

AGRIDAPE, 2015. *Des sols durables*, revue, volume 31-N° 1, 36 p.

Agueguia, 2000. *Agriculture Spéciale : les céréales*, Université de Dschang, FASA, 37 p.

Ange A., 1991. *La fertilité des sols et les stratégies paysannes de mise en valeur des ressources naturelles*, Savanes d'Afrique, Terres fertiles, CIRAD-Montpellier, France, 587 p.

APAD, 2017. *Les 3 piliers de l'agriculture de conservation*. <https://www.apad.asso.fr/agriculture-de-conservation-3/principes-de-lac>, Consulté en novembre 2017.

Arbonnier M., 2002. *Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'Ouest*, 2^{ème} Edition, CIRAD, Paris, France, 574 p.

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pontanier R., 2010. *Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides, Le vocabulaire et les concepts*, Paris, France, p 11-29.

Aronson J., 2010. *Réhabilitation écologique*. Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, Montpellier, France et Missouri Botanical Garden, USA, 56 p.

Barbier, E.B. et Bishop, J.T., 1995. *Economic values and incentives affecting soil and water conservation in developing countries*, Journal of Soil and water Conservation, 50(2), p.133– 137.

Barralis G., 1977. *Répartition et densité des principales mauvaises herbes en France*, 74 p.

Bationo A., Kihara J., Vanlauwe B., Waswa B., Kimetu J., 2007. *Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems*, Agricultural Systems, p.13-25.

Bayle, 1994. *La fixation symbiotique d'azote atmosphérique*, Rapport de licence de physiologie végétale appliquée, Université des Sciences et Techniques de Languedoc, 50 p.

Beernaert F. et Bitondo D., 1993. *Land Evaluation Manual*, Centre Universitaire de Dschang, 1993, p 68.

Bélanger F. 1996. *Engrais et amendements organiques*. Pages 161-176, in Colloque sur la fertilisation intégrée des sols, cahier de conférences. Conseil des Productions Végétales du Québec, 257 p.

Bello N., Adoum Y., Hinimbio T.P, 2004. *Abandon de production de la fumure organique*, Cellule de Suivi-Evaluation, SODECOTON, Garoua, Cameroun, p 5.

Bergersen F.J., 1980. *Methods for evaluating biological nitrogen fixation*, Wiley, Chichester, p 24.

Bertrand R., Gigou J., 2000. *La fertilité des sols tropicaux*. Edition Maisonneuve et Larose, Collection Le technicien d'agriculture tropicale, 397 p.

Beidi G., 2000. *Caractérisation et typologie des rotations et successions culturales paysannes ; et aptitudes des terres utilisées à la production dans la région de Mindif*, mémoire, FASA, Université de Dschang, Cameroun, 76 p.

Beunard P., 1984. *Contribution à l'étude de la fixation d'azote chez les légumineuses : influence du milieu sur la symbiose, mise au point de techniques en vue de la fixation en pays tropicaux*, Mémoire présenté en vue de l'obtention du passage de la catégorie 3T à la catégorie 4TA. IRAT, division d'agronomie, 101 p.

Bikay Bi Babiny S.B., 2005. *Inventaire de la macrofaune en culture cotonnière sous 4 modes de gestion des sols : cas de Windé-Pintchoumba et Zouana*, Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome, PV, FASA, Université de Dschang, 70 p.

BIS, 1963. *Sols africains*, Vol. VIII, CCTA, Lagos, Nigéria, p6.

Bishop, R.C. and Welsh, M.P., 1992. *Existence values in benefit-cost analysis and damage assessment*, *Land Economics*, p 405–417.

Blaikie P. and Brookfield H., 1987. *Land degradation and society*, Methuen London and New-York, p 34.

Blanchard M., 2010. *Gestion de la fertilité des sols et rôle du troupeau dans les systèmes coton-céréales-élevage au Mali-Sud, Savoirs techniques locaux et pratiques d'intégration agriculture-élevage*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Créteil, Val De Marne, 301 p.

Bojo, J., 1996. *The costs of land degradation in Sub-Saharan Africa*. *Ecological Economics*, 16(2): 161–173.

Bojö, J.P., 1991. Economics and Land Degradation. *Ambio*, 20(2), p.75-79. Blay D., Bonkougou E., Chamshama s. and Chi- kamai B., 2004. *Rehabilitation of degraded lands in Sub-Saha- ran Africa: lessons learned from selected case studies*, IUFRO-SPDC, FORNESSA, 16 p.

Boli B. Z., 1996. *Fonctionnement des sols sableux et optimisation des pratiques culturales en zone soudanienne humide du Nord-Cameroun*, Thèse de Doctorat en Sciences de la terre, Option Science du sol et productions végétales, Université de Bourgogne, France, 326 p.

Bonneau M. et Souchier B., 1994. *Pédologie : constituants et propriétés du sol*, 2^{ème} édition, Masson, Paris, France, 665 p.

Bouaboub K., 1991. *L'influence des nitrates sur la fixation symbiotique de l'azote chez le pois chiche*, Mémoire d'ingénieur, INA Alger, p 55.

Boucif H., 2011. *Evaluation de l'état des seuils de correction torrentielle sur quelques ravines à l'amont du barrage de Hammam Boughrara*, Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en foresterie, Université d'Abou Bekh Belkaid, Algérie, 84 p.

- Bounaama S., 2014. *Evaluation de l'amélioration de la fertilité des sols emblavés par une légumineuse fourragère en relation avec la symbiose Rhizobium dans la région d'El Goléa*, 78 p.
- Bourguignon C. et Lydia B., 2008. *Le sol, la terre et les champs, Pour retrouver une agriculture saine*, Les dossiers de l'écologie, 222 p.
- Brabant P., 1991a. *Le sol des forêts claires du Cameroun, Tome I*, ORSTOM, MESIRES, Bondy, France, p 199.
- Brabant P., 1991b. *Le sol des forêts claires du Cameroun, Tome II*, ORSTOM, MESIRES, Bondy, France, p 121.
- Brabant P. et Gavaud M., 1884. *Carte des sols, provinces du Nord et de l'extrême-Nord*, ORSTOM, MESIRES, Bondy, France, p 6.
- Brabant P. et Gavaud M., 1885. *Les sols et les ressources en terre du Nord-Cameroun*, Collection Notice Explicative 103, MESIRES-IRA Yaoundé, ORSTOM, 258 p.
- Brady N.C. and Weil R.R., 2008. *The nature and properties of soils*, p 32.
- Brink et Achigan-Dako, 2005. *Plantes à fibres, Ressources végétales de l'Afrique Tropicale*, Vol. 16, Fondation PROTA, Wageningen, 659 p.
- BRL, 2010. *Diffusion des techniques de semis direct sur couverture végétale, Rapport final de campagne agricole 2009-2010 du lot 3, Projet BV Lac*, MAEP, 78 p.
- Brown G. G., Benito N. P., Pasini A., Sauter K. D., Guimaraes, M. F., and Torres, E., 2002: *No-tillage greatly increases earthworm populations in Parana state, Brazil*, *Pedobiologia*, 47, 764–771.
- BUCREP, 2010. *3^{ème} recensement général de la population et de l'habitat de 2005 et la population du Cameroun en 2010*, Yaoundé, Cameroun, p. 6.
- Bullock D.G. 1992. *Crop rotation*, *Critical reviews and plant sciences*, 11 (4): 309-326.
- Cachan P. et Mangenot G., 2010. *Symbiose*, Encyclopædia Universalis, consulté le 17 juillet 2017, URL : <http://www.universalis.fr/encyclopedie/symbiose>
- CEMAGREF, 1993, *Matériel de travail du sol, semis et plantation, Technologies de l'agriculture*, 1^{ère} édition, Paris, 156 p.
- Chalk P. M., Smith C. J., Hamilton S. D. and Hopmans P., 1993. *Characterisation of the N benefit of a grain legume (Lupinus angustifolius L) to a cereal (Hordeum vulgare L) by an in situ ¹⁵N isotope dilution technique*, *Biology and Fertility Soils*, 15:39-44.
- Chalifour, F.P. 1982. *Activité saisonnière de la nitrate réductase en fonction du temps d'application de l'azote d'appoint chez des hybrides de maïs de maturité différente et relation avec le rendement en plante entière, en grain et en protéines*. Thèse de maîtrise, Université Laval, Sainte-Foy, Québec, 141 pages.

Chaudhury J., Singh D.P. and Hazra S.K., 1978. *Sunn hemp*. Central Research Institute for jute and allied fibres (ICAR), <http://assamagribusiness.nic.in/Sunnhemp.pdf> (accessed 10 June 2017).

Chebouti and Abdelgherfi, 2000. *Effect of water stress on growth and forage yield on three species of medics*. Cah Options Mediterranée, 62: 319-322.

Cherr C.M., Scholberg J.M.S. and McSorely R., 2006. *Green manure as nitrogen source for sweet corn in a warm-temperate environment*. Agronomy J. 98 (5):1173-1180.

Chopra R.N., Naayar S.L. and Chopra I.C., 1956. In: *Glossary of Indian medicinal plants*, Council of Scientific and Industrial Research, New Delhi, India.

CIRAD, 2008a. *Les SCV dans le monde*, Paris, p. 9.

CIRAD, 2008b. *Regional workshop on conservation agriculture, investing in sustainable agriculture: the case of conservation agriculture and direct seeding mulch-based cropping systems*, Laos, p 56.

CIRAD-GRET, 2002. *Mémento de l'Agronome*, Ministère Français des Affaires Étrangères, Paris, p 448-477.

Citeau L., Bispo A., Bardy M. et King D., 2008. *Gestion durable des sols*, Editions Quae, Collection Savoir-faire, Versailles Cedex, France, 320 p.

Clark A., 2007. *Sunn hemp, Crotalaria juncea*. In: *Managing cover crops profitably*. 3rd edition, Sustainable Agriculture Research and Education, College Park, MD. <http://www.sare.org/Learning-Center/Books/Managing-Cover-Crops-Profitably-3rd-Edition/Text-Version/Printable-Version> (accessed 3 May 2017).

Cook C.G. & White G.A., 1996. *Crotalaria juncea: a potential multi-purpose fibre crop*. In: Janick, J. (Editor), *Progress in new crops*. ASHS Press, Alexandria, Virginia, United States, p 389–394.

Crovetto L.C., 2000. *Les fondements d'une agriculture durable: préserver le sol aujourd'hui pour nourrir les hommes demain*. Panam, Chili, 318 p.

CTA, 1966. « *Erosion control in the tropics* », Wageningen, Agrodok, p. 6.

Danso S.K.A. et Eskew D.L., 1985. *Comment renforcer la fixation biologique de l'azote*, AIEA Bulletin, vol 26, N° 2, 5 p.

De Graaff J., 1997. *The price of Soil Erosion, an economic evaluation of soil conservation and watershed development*, Wageningen Agricultural University, p.8.

Déat M., 1977. *Etude économique de deux herbicides en culture cotonnière en Côte d'Ivoire*, Coton et Fibres tropicales, 28 (2): 293-295.

Decker AM., Clark AJ., Meisinger J.J., Mulford F. R. and McIntosh M.S., 1993. *Legume cover crop contributions to no-tillage corn production*, Agronomy Journal, 88:126-135.

Deguine J.P., 1995. *Bioécologie et épidémiologie du puceron Aphis gossypii Glover, 1877 (Hemiptera, Aphidiidae) sur cotonnier en Afrique Centrale. Vers une évolution de la protection phytosanitaire*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, France, p. 18.

Denarie J.; Truchet G., 1979. *La symbiose Rhizobium-légumineuses : rôles respectifs des partenaires*. Physiologie Végétale, 17(4) : 643-667.

Deutsch L., Folke C. et Skaanberg K., 2003. *The critical natural capital of ecosystem performance as insurance for human well-being*, Ecological Economics, 44(2-3): 205–217.

Deybe D., 1994. *Vers une agriculture durable : Un modèle bio-économique*, Agritrop, CIRAD-URPA, Paris, France, 193 p.

Dommergues Y., Duhoux E. et Diem H., 1999. *Les arbres fixateurs de l'azote*, ed, CRAD, édition espace 34, FAO, IRD, p 499.

Dommergues Y. et Mangenot F., 1970. *Écologie microbienne du sol*, Cornell University, 769 p.

Donfack P., Moukouri K.H., Mainam F., Oumar H., Seiny Boukar L., Masse D., Pontanier R., Velche J.P. et Floret C., 1993. *Réhabilitation et utilisation des terres marginales au Nord-Cameroun*, Rapport final, Commission des Communautés Européennes, Contrat TS10077M(CD), IRA, ORSTOM et Centre L. Emberger, 106 p.

Donfack P., Moukouri K.H., Mainam F., Seiny Boukar L., Abega R., Ayangma A., Djoko A., Naah E., Ntonga J.C., Sighomnou D., Carré P., Pontanier R., Sayol R., Seghier J. Thebé B. et Floret C., 1988. *Utilisation et conservation des ressources en sol et en eau au Nord-Cameroun*, Rapport final, Commission des Communautés Européennes, Contrat T.S.D. A.216 CAM (5), IRA, ORSTOM et Centre L. Emberger, 238 p.

Doucet R. 2006. *Le climat et les sols agricoles*, Edition Berger, Eastman, Québec xv, 443 p.

Douglas M., 1994. *Sustainable use of agricultural soils*, A review of the prerequisites for success or failure. Development and environment reports No 11. Institute of Geography, University of Berne, Swiss, p 28.

Dounias I., 2001. *Les systèmes de culture à base de couverture végétale et semis direct en zones tropicales*, Synthèse bibliographique, Etudes et Travaux n° 19, p 164.

Drost and Doll 1980. *Phytotoxic substances of plants have a different degree of inhibition on various plant species*, p 23.

Dufumier M., 1996. *Les projets de développement agricole*, Manuel d'expertise, CTA-KARTALA, Wageningen, Pays-Pas, 354 p.

Dugué P. et Olina Bassala J.P., 2014. *Processus d'innovation et recomposition des territoires agricoles : le cas du semis sous couvert végétal au Nord du Cameroun*, article, 12 p.

Dugué P., Autfray P., Blanchard M., Djamé P., Dongmo A.L., Girard P., Olina J.P., Ouedrago S., Sissoko F., Vall E., 2012. *L'agroécologie pour l'agriculture familiale dans les pays du Sud : impasse ou voie d'avenir ? Le cas des zones de savane cotonnière de l'Afrique de l'Ouest et du Centre*, Colloque René Dumont, Atelier 1 : Agroécologie, Paris, 15 et 16 novembre 2012, 22 p.

Dugué P., 2009. *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, 98 p.

Duke J.A. 1983. *Handbook of energy crops NewCROP*, Purdue University Center for New Crops and Plant Products. http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Crotalaria_juncea.html (accessed 12 July 2016).

Durand J.H., 1957. *Les croûtes calcaires s.l. d'Afrique du Nord étudiées à la lumière de la bio-rhexistase*, Travaux des sections pédologie et agrobiologie, Bulletin N°2 – 1956, Algérie, p 26.

Dutoit T. et Sabatier M., 2010. *De la recherche aux pratiques : enjeux et réalités de la restauration*, Le Dossier, CNRS, Montpellier, France, 14 p.

ECAM 4, 2014. *Présentation des premiers résultats de la quatrième enquête camerounaise auprès des ménages*, INS, Yaoundé, Cameroun, 8 p.

Eaglesham A.R.J, Ayanaba A.V., Ranga Rao and Eskew D.L., 1982. *Improving the nitrogen nutrition of maize by intercropping with cowpea*. Soil Biology and Biochemistry 13:169-171.

Ekins P., 2003. *Identifying critical natural capital: Conclusions about critical natural capital*, Ecological Economics, 44(2-3), p.277–292.

Ekins P., Simon S., Deutsch L., Folke C., De Groot R., 2003. *A framework for the practical application of the concepts of critical natural capital and strong sustainability*, Ecological Economics, 44(2-3), p.165–185.

Eno Belinga S. M., 1984. *Géologie du Cameroun*, Université de Yaoundé, Cameroun, 307 p.

Eno Belinga S. M., 1983. *Géologie dynamique externe des pays tropicaux de la terre, Les paysages du fer*, Université de Yaoundé, Cameroun, 306 p.

Epstein E., 1972. *Mineral nutrition of plants: Principles and Perspectives*. Wiley, New-York, p 21.

Erhart H. 1951. *La genèse des sols en tant que phénomène géologique, Esquisse d'une théorie géologique et géochimique, Biostasie et rhexistase*, Masson, Paris, 90 p.

- Evans L.T., 1998. *Feeding the ten billion*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, p 31.
- FAO, 2018. *Agriculture de conservation*, Département de l'agriculture et de la protection des consommateurs, agriculture de conservation, <http://www.fao.org/ag/ca/fr/index.html>, (consulté le 23 juin 2018).
- FAO, 2004. *Gestion participative des ressources naturelles : démarches et outils de mise en œuvre en Afrique de l'Ouest*, Manuel du technicien, 85 p.
- FAO, 2003. *Statistical data base*. <http://apps.fao.org/page/collections> agriculture.
- FAO, 2002. *La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres*, Rome, p. 12.
- FAO, 1993. *Towards and integrated control of Striga in Africa. Proceedings of the second general workshop of the Panafrican Striga Control Network (PASCON)*, FAO, Nairobi, Kenya, p. 27.
- FAO, 1992. *Fichier technique de la fixation symbiotique de l'azote*, Rome, Italie, p 7.
- FAO, 1988. *Directives*, Rome, Italie, p 121.
- Fernandes P., Minatchi S., Asensio R., 2014. *Crotalaria juncea, fiche technique*, RITA, CIRAD, Martinique, 2p.
- FLDACS, 2004. *Water quality/Water quantity: Best management practices for Florida vegetable and agronomic crops*. <http://www.floridaagwaterpolicy.com/BMP.html>, (consulté le 14 Décembre 2017)
- Forestier J., 1958. *Etudes sur le phosphore assimilable dans les sols latéritiques de l'Oubangui*, ORSTOM, 25 p.
- Fotsing E. et Mainam F., 2003. *Dynamique du sorgho de contre saison et potentialités des sols en zone de savane de l'Extrême-Nord du Cameroun*. Jean-Yves Jamin, L. Seiny Boukar, Christian Floret, hal-00128923, Cirad - Prasac, 7 p.
- François et Gaudry, 1997. *Assimilation de l'azote chez les plantes (aspect physiologique, biochimique et moléculaire)*, ed, INRA, p 422.
- Gabathuler, E., Liniger, H. P., Hauert, C., and Giger, M., 2009. *Benefits of sustainable land management*, WOCAT/UNCCD, University of Bern, Switzerland, Centre for Development and Environment (CDE), p 27.
- Gameel O. I., 1965. *Host plant of the cotton whitefly in the Gezira, Managil and Khashm el Girba*. Annual report of the Gezira research station and sub-station, Soudan 1965 – 66: 142 – 147.

- Gavaud M., 1971. *Les sols hardés du Nord-Cameroun (sols halomorphes, sols lessivés, planosols, sols hydromorphes)*. Mise au Point Bibliographique, Bull Liais, Thème B, p 18.
- Géraud de S., 1996. *La fertilisation d'hier à aujourd'hui, Connaissances et pratiques*, 8 p.
- Giasson P. et Jaouich A., 2008. *Les propriétés chimiques du sol*, p17-20.
- Giller K.E. et Wilson K.J., 1991. *Nitrogen fixation in tropical cropping systems*. 313 p.
- Giraud P.N., 2008. *Ressources naturelles et solidarité entre générations*, Etudes, p.329.
- Giraud E., 2007. *Symbiose Rhizobium/légumineuse : un nouveau sésame*, Médecine-Sciences, 4 p.
- Goodwin T. W. and Mercer E.I, 1986. *Introduction to plant biochemistry*, 2nd Edition, Pergamon Press, New York, p 23.
- Guinot C., 2007. *L'agriculture et l'environnement en bonne intelligence*, 4p.
- Hardarson G. and Danso S.K.A., 1993. *Methods for measuring biological nitrogen fixation in grain legumes*, Plant and Soil, 152: 19-23.
- Haman Oumar et Seiny Boukar, 1992. *Enquête sur la dégradation des vertisols dans le Nord-Cameroun*, IRA, Maroua, 52p.
- Harris G.H. and Hesterman O.B., 1990. *Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using nittogen-15*, Agronomy Journal, 82: 129-134.
- Heichel G. H. 1987. *Legumes as a source of nitrogen in convention tillage systems in: The role of legumes in conservation tillage systems*. Soil Conservation society of America, Ankeny, Iowa, p 29-35.
- Hesterman O.B., 1988. *Exploiting forage legumes for nitrogen contribution in cropping systems* in W.L Haigrove (Ed)' *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. Special Publication, 51 ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI, p 26.
- Hesterman O. B., Russelle M. P., Sheaffer C. C. et Heichel G. H., 1979. *Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume corn rotations*. Agron. J. 79: 726-731.
- Hieng I.O., 2010. *Etude des paramètres géotechniques des sols du Cameroun*, p. 37.
- Hinimbio T.P., 2017. *Mouvement coopératif en zone cotonnière du Cameroun : mutations, atouts et enjeux*, Editions CLE, Yaoundé, Cameroun, 194 p.
- Hinimbio T.P., 2016. *Agroécologie et gestion durable des sols en Afrique soudano-sahélienne*, L'harmattan, Paris, France, 222 p.

Hinimbio T.P., 2014. *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, 108 p.

Horus Entreprises, 2009. *Mission d'appui à la SODECOTON en vue d'améliorer son système d'appui aux producteurs, partie 2 - aspects relatifs aux SCV*, Paris, France, p 35.

Huntington T.G., Grove J.H. and Frye W.W., 1985. *Release and recovery of nitrogen from winter annual cover crops in no till corn production*, Communication on Soil Science and Plant Analysis, 16: 193-211.

Husson O., Séguy L., Charpentier H., Bouzinac S., Michellon R., Chabanne A., Boulakia S., Tivet F., Naudin K., Enjalric F., Chabierski S., Rakotondralambo P., Rakotondramanana, 2008. *Principes et intérêts du semis direct, Volume I. Chapitre 2 : La gestion des écosystèmes cultivés en semis direct sur couverture végétale permanente*. CIRAD, France, 32p.

IFPRI, 1995. *A 2020 vision for food, agriculture and environment*, IFPRI, Washington DC, p.10

INRA, 2000. *Les analyses biologiques des systèmes de travail du sol*, Paris, 15 p.

INRA, 2008. *Lessivage du nitrate et dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : impact, prévision, prévention, suivi, cartographie*, 22 p.

Inter-réseaux, 2014. *Grain de sel N° 63-66, La revue du développement rural*, Paris, France, 62 p.

IRA, CIRAD et ORSTOM, 1993. *Les terres Hardé, Caractérisation et réhabilitation dans le bassin du Lac Tchad*, Cahiers scientifiques No 11, Supplément de bois et forêts des tropiques, Mémoires et travaux de l'IRA No 6. Yaoundé, Cameroun, 121 p.

IRAD, 2011. *Culture intensive, séchage et conservation du maïs*, Bulletin technique, Projet PPTE-Semences, IRAD, Yaoundé, Cameroun, 10 p.

IRD, 2005. *Le ver de terre, star du sol*, Laboratoire d'écologie des sols tropicaux, 5 p.

Jourdain D. and Scopel E., 2000. *Impact of conservation tillage on the productivity and stability of maize cropping systems: a case study from western Mexico*, Document CIRAD/CIMMYT, Montpellier, France, p. 18.

Kichou et Sahraou, 2001. *La fixation et l'assimilation de l'azote chez le pois chiche*, Article, Alger, p 8.

Koch W. Beshir M.E., Unterladstatter, 1982. *Crop losses due to weeds. In Improving weed management*, FAO Plant Production and Protection Paper no 44, FAO, Rome, Italia, p. 154.

Krishna N. et Oumarou B., 2004. *Systèmes de culture sur couverture végétale, Synthèse des résultats, campagne 2003*, SODECOTON, CIRAD, 105p.

Kurt Georg Steiner, 1966. *Causes de la dégradation des sols et approches pour la promotion d'une utilisation durable des sols*, GTZ, Margrafverlag, p. 5-13.

Labassi M., 1991. *L'effet de la fertilisation phosphate sur la capacité de fixation de l'azote et sur le rendement d'une variété de pois chiche*, Mémoire d'Ingénieur INA Alger, p. 59.

Ladd J.N. and Amato M., 1986. *The fate of nitrogen from legume and fertilizer source in soils successively cropped with wheat under field conditions*, Soil Biology and Biochemistry, 18: 417-425.

Lal. R., Hall G.F. and Miller, F.P., 1989. *Soil degradation: I. Basic processes*, Land Degradation et Development, p.51-69.

Lamaze T., Khamis S., Foyer C., Farineau J., Valadier M.H. et Mont-Gaudty J.F, 1990. *Effet d'une limitation en N sur la photosynthèse chez le maïs*, Dans Physiologie et production du maïs. INRA, Paris, p. 113-121.

Latiri K., 2002. *La fertilisation : engrais et production agricole*, Atelier sur la gestion de la fertilisation potassique, acquis et perspectives de la recherche, Institut National de la Recherche Agronomique de Tunisie, Tunis 10 décembre 2002, 9 p.

Lawn R. J. and Brun W. A., 1974. *Symbiotic nitrogen fixation in soybeans*, 303 p.

Le Bourgeois T. et Merlier H., 1995. *Adventrop, Les adventices d'Afrique soudano-sahélienne*, CIRAD-CA, Montpellier, France, p. 110-112.

Leclerc, 1995. *Evaluation quantitative des composts*, www.memoireonline.com/06/08/1169/m, consulté le 16 Mai 2016, p. 2.

Lemenih, M., 2004. *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, 312 p.

Levrat R., 2010. *Culture commerciale et développement rural, l'exemple du coton au Nord-Cameroun depuis 1950*, L'Harmattan, Paris, France, 297p.

Longchamp R., 1997. *Seuil de nuisibilité des mauvaises herbes. I : Généralités sur la nuisibilité des mauvaises herbes*, Phytoma, p. 7.

Lozet J. et Mathieu C., 1997. *Dictionnaire de science du sol*, 3^{ème} édition, Lavoisier, Paris, France, 488 p.

LP AGEPUR, 2015. *Fonctionnement des végétaux : cycle de l'azote*. Cours, Sorbonne, 44 p.

Madi A., Loth P. and Iongh Hans, 2000. *Management of fragile ecosystems in the North of Cameroon, The need for an adaptative approach*, Proceedings of an international conference, Maroua, 13-16 November 2000.CEDC/CML, p 81.

Madi A., 1994. *Politique agricole et élasticité de l'offre dans les exploitations de la zone cotonnière au Cameroun*. Thèse de Doctorat ENSAM, Montpellier, France, p 18.

Mannetje, L. 2012. *Crotalaria juncea*. FAO grassland species index. <http://www.fao.org/ag/AGP/AGPC/doc/Gbase/DATA/PF000475>. HTM (accessed 29 July 2016).

Mansoer, Z., D.W.Reeves, and C.W.Wood. 1997. *Suitability of sunn hemp as an alternative late-summer legume cover crop*, Soil Science and Society, Am. J. 61(1):246–253.

Marasas M. E., Sarandón S. J., and Cicchino A. C., 2001. *Changes in soil arthropod functional group in wheat crop under conventional and no tillage systems in Argentina*, Applied Soil Ecology, 18: 61–68.

Maroyi, A., 2011. *Crotalaria juncea* L., fiche de PROTA4U, Wageningen, Pays Bas, 12 p.

Mayaka T.B, Iongh H., Sinsi B., 2007. *Ecological restoration of Savanna Ecosystems*. Proceedings of the third RNSCC International Seminar, 6th February, Cotonou, Benin, CEDC/CML, Leiden University, p. 8.

Mboob S.S., 1989. *A regional program for Striga control in West and Central Africa. Proceedings of the FAO/OAU all Africa government consultation on Striga control, Maroua, Cameroun, 20-24 October 1988. FAO Plant Production and Protection no 96, FAO, Rome, Italia, p 190-194.*

Mekem, 2013. *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, 62 p.

Mengel K., Ernest A. and Kirkby, 1974. *Nitrogen fixation by Rhizobium bacteria*, p 8.

MINEPAT, 2012. *Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire de l'Extrême-Nord*, Termes de référence, Yaoundé, Cameroun, p.2.

Millennium ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and human well-being: Synthesis*, Island press Washington, DC, p 18.

Muller J.-P., 1979. *Carte des sols du Cameroun*, ORSTOM, IRA, publiée aux Editions Jeune Afrique.

Mvondo Awono J.P., Boukong A., Beyegue H. D., Abou Abba A., Mvondo Ze A. D., Passale M. S., Lawane, 2012. *Production de biomasse de Brachiaria ruziziensis (Germain et Evrard) en vue de la mise en place de systèmes de culture sous couvertures*

végétales dans la zone cotonnière du Cameroun, Cameroon Journal of Experimental Biology Vol.8, N° 1, CAFOBIO, p.2.

Mvondo Awono J.P., 1997. *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, 235 p.

Mvondo Zé A., 2001. *Fertilité et Fertilisation des sols*, FASA, Université de Dschang, 58 p.

Muller J.P., 1979. *Carte des sols du Cameroun*, IRA, Station agronomique de Nkolbisson, Laboratoire de Pédologie, Yaoundé, Cameroun, 2 p.

Muluneh, A., Biazin, B., Stroosnijder, L., Bewket, W., and Keesstra, S., 2014. *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.

N'Dayegamiyé A., 2007. *La contribution en azote du sol reliée à la minéralisation de la matière organique du sol : facteur climatique et régies agricoles influençant les taux de minéralisation d'azote*. Colloque sur l'azote. Québec, Canada, p.7.

Naudin K., 2012. *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, 220 p.

Ndah H. T., Schuler J., Uthes S., Zander P., Triomphe B., Mkomwa S., and Corbeels M., 2015. *Adoption potential for conservation agriculture in Africa: a newly developed assessment approach (QAToCA) applied in Kenya and Tanzania*, Land Degradation Development, 26: 133–141, doi:10.1002/ldr.2191.

Ndaodeme K., 2012. *Effets pédologiques du semis direct sous couverture végétale en zone de montagne : cas de Kilwo*. Rapport de stage, ISS, Université de Maroua, 27 p.

Newcomb R.D., Campbell P. M., Ollis D. L., Cheah E., Russell R. J., and Oakeshott J. G. *A single amino acid substitution converts a carboxylesterase to an organophosphorus hydrolase and confers insecticide resistance on a blowfly*, 94(14): 7464–7468.

Newman A., 1994. *A Mathematical Model for Mass Extinction*, Cornell University, 11p.

Ngalieu Désiré, 2015. *L'industrialisation raisonnée de l'agriculture africaine : une clé pour l'émergence*, L'Harmattan, Paris, France, 222 p.

Nguy Ntamack F.C., 2001. *Physiologie végétale*, FASA, Université de Dschang, Cameroun, 50 p.

Njomaha C., Olina B.J.P., Abou Abba A., Oumarou B., 2010. *Diffusion des systèmes de cultures sur couverture végétale au Nord-Cameroun : contraintes d'adoption et perspectives*, Acte du colloque, Ouagadougou, Burkina Faso, Décembre 2010, 10 p.

Nkonya, E., Gerber, N., Baumgartner, P., Von Braun, J., De Pinto, A., Graw, V., Kato, E., Kloos, J., Walter, T., 2011. *The economics of desertification, land degradation, and drought toward an integrated global assessment*, p 45.

Olina Bassala J.P., 2010. *Le semis direct sans labour et avec utilisation des herbicides dans la zone cotonnière au Nord Cameroun. Diffusion, impacts agronomiques et socio-économiques d'une innovation en pleine expansion*, Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, France, 301 p.

ONU, 2015. *Adoption des 17 Objectifs de développement durable du Programme de développement durable à l'horizon 2030*, 25 septembre 2015, Sommet de New-York, USA, p 8.

Orkwor G.C., 1983. *Problems of weed control in mixed cropping systems in the least developing countries*. In Comptes rendus de la 2^e conférence bisannuelle SOAM / WAWSS. Abidjan, Côte d'Ivoire, p. 19.

ORSTOM, 1980. *Les sols au Nord-Cameroun*, Paris, France, 7 p.

ORSTOM, 1962. *Recherches et études camerounaises*, Paris, France, 68 p.

Oumarou B., 2012. *Capital sol et arrangements institutionnels dans les agrosystèmes du Nord-Cameroun*, Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de Montpellier SupAgro, France, 213 p.

Paré T. et Chalifour F.P., 1993. *Efficacité d'utilisation de l'N de différents systèmes culturaux céréales-légumes afin de limiter les émissions d'oxyde nitreux (N₂O)*, Revue bibliographique. Contrat N°ASC:01396-2-CW01-XSK Ministère de l'Agriculture, 68 p.

Paré T., Chalifour, Bourassa J. et Antoun H., 1992. *Forage-corn dry matter yields and N uptake as affected by previous legume and nitrogen fertilizer*. Can. J. Plant Science, 72: 699-712.

Paré T., Chalifour, Bourassa J. et Antoun H., 1993. *Forage corn production and N fertilizer replacement values following 1 or 2 years of legumes*. Can. J. Plant Science, 73: 477-493.

PCS –ESA 2, 2010. *Rapport d'activités*, Garoua, Cameroun, 86 p.

Perkins, J., Reed, M., Akanyang, L., Athlopheng, J., Chanda, R., Magole, L., Mphinyane, W., Mulale, K., Sebege, R., Fleskens, L., Irvine, B., and Kirkby, M., 2013. *Making land management more sustainable: experience implementing a new methodological framework in Botswana*, Land Degradation Development, 24: 463–477, doi:10.1002/ldr.1142.

- Pieri C., 1989. *Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherche et développement agricoles au sud du Sahara*. Ministère de la Coopération et CIRAD-IRAT, Paris, France, p. 42.
- Pimentel, D., 2006. *Soil erosion: a food and environmental threat*, *Environmental, Development and Sustainability*, 8: 119–137.
- Pimental, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Sphpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., and Blair, R., 1995. *Environmental and economic cost of soil erosion and conservation benefits*, *Science*, 267: 1117–1123.
- Plenet D., Lubet E., Desvignes P. et Sombrun F., 1990. *Fertilisation et composantes du rendement du maïs : effets des niveaux et des modalités d'apport*, dans : *Physiologie et production du maïs*, INRA, Paris, p 367-382.
- Projet ESA, 2003. *Rapport d'activités*, SODECOTON, Garoua, Cameroun, 76p.
- Ramahatoraka H. A., Rakotondravelo J.C., Penot E. et Faure G., 2011. *Analyse des services agricoles liés à l'adoption des systèmes de culture sous couverture végétale (SCV), cas de la zone du lac Alaotra*. Document de travail BV lac N° 67, Ministère malgache de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche, CIRAD, AFD et UMR, 42 p.
- Randrianjafizanaka M. T., 2010. *L'influence du semis direct sous couverture végétale (SCV) sur la croissance et le développement du Striga*, Mémoire de fin d'étude, Diplôme d'ingénieur, Institut Saint Joseph Antirabé, Madagascar, p. 27.
- Raunet M., 2006. *Impacts économiques des SCV au Sud : Biens, services et fonctions rendus par les agroécosystèmes SCV aux agriculteurs et autres collectivités, Quelques éléments à discuter*, La Gazette des SCV au CIRAD, Montpellier, France, p. 12.
- Raunet M. et Naudin K., 2006. *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, 40 p.
- Raunet M. et Seguy L., 2006. *Quelles méthodologies de recherche pour les SCV au CIRAD ?* CIRAD, Montpellier, France, p 1-3.
- Raunet M., 2003. *Quelques clés morphopédologiques pour le Nord-Cameroun à l'usage des agronomes*, 24 p.
- Reboul J-L, 1997. *Systèmes de cultures sans labour par semis direct sur couvertures permanentes des sols, adaptation et diffusion à Madagascar*, CIRAD, p 441-455.
- Reboul C., 1976. *Mode de production et système de culture et d'élevage*, in *Economie rurale*, No 112, Paris, France, p 6.
- Reij C., Scoones I., Toulmin C., 1996. *Techniques traditionnelles de conservation de l'eau et des sols en Afrique*, CTA, CDCS, Karthala, p 360.
- Rigaud J. et Gadat P., 1985. *Nutrition azotée des légumineuses*, Ed, INRA Paris, p 556.
- Roose, 1992. *Capacité des jachères à restaurer la fertilité des sols pauvres en zone soudano-sahélienne d'Afrique Occidentale*, ORSTOM, Montpellier, 12 p.

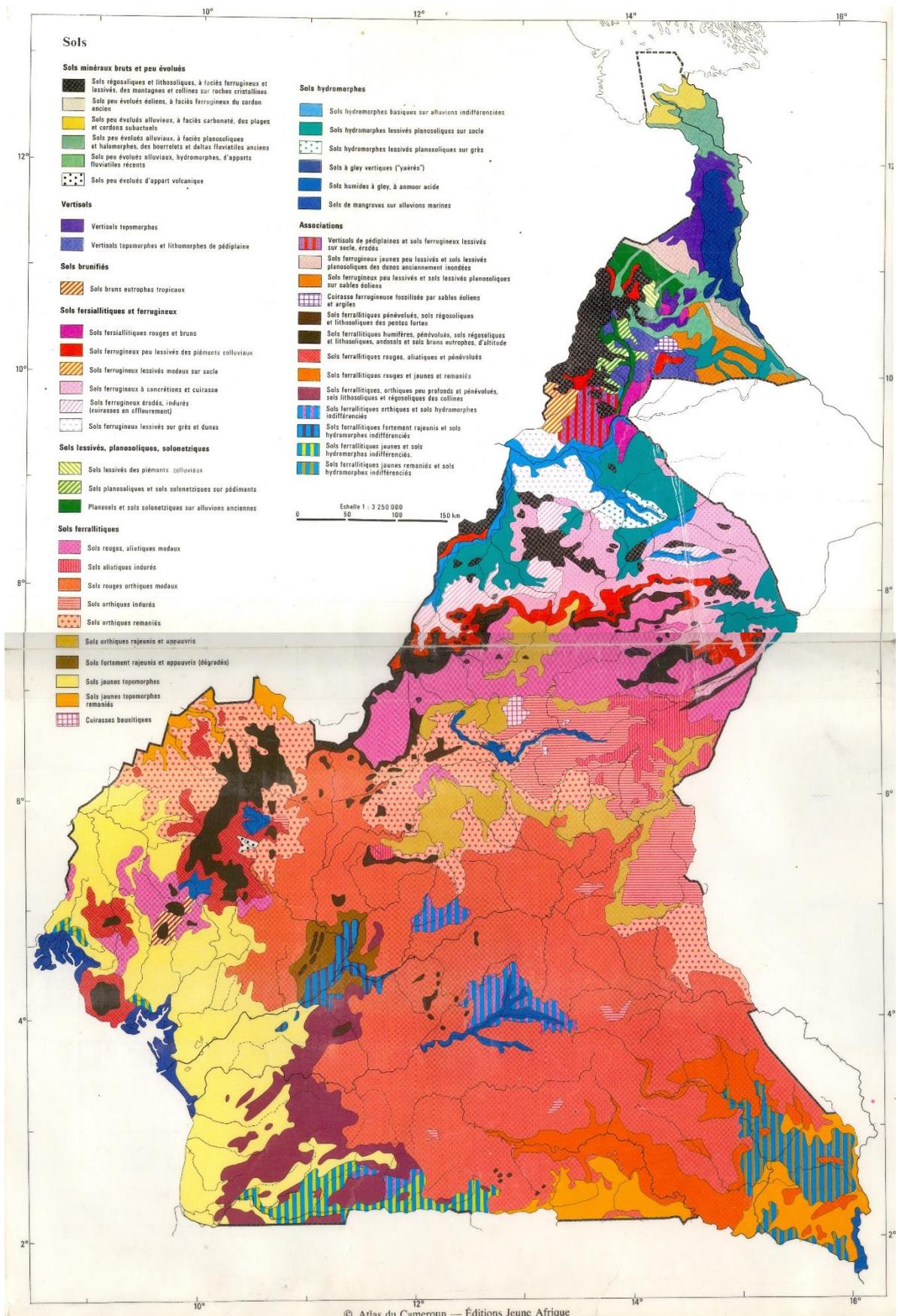
- Ruellan A., 1994. *Dégradation et gestion des sols*, 56 p.
- Russelle, M. P., Hesterman O. B., Sheaffer C. C. and Heichel G. H., 1987. *Estimating nitrogen and rotation effects in legume-corn rotations* in: The role of legumes in conservation tillage systems. Soil Conservation society of America, Ankeny, Iowa, p 29-35.
- Sainju U.M., Whitehead W.F., Singh B.P. and Wang S, 2006. *Tillage, cover crops, and nitrogen fertilization effects on soil nitrogen and cotton and sorghum yields*, European Journal of Agronomy, 25 (4): 372–382.
- Sarrantonio M. 1994. *Northeast Cover Crop Handbook*, Edition Rodale Institute, PA, États-Unis, 118 p.
- Sarrantonio M. et Scott T.W., 1988. *Tillage effects on availability of nitrogen to corn following a winter green manure crop*, Soil Sci. Soc. Am. J., 52: 1661-1668.
- Saxena K.B. and Singh M.D. 1987. *Can seed size and protein content in pigeon pea be increased simultaneously?* p 171.
- Schultze-Kraft, R. et J.K. Teitzel. 1992. *Brachiaria ruziziensis* Germain & Evrard. In: Mannetje, L. and Jones, R.M. (eds) *Plant Resources of South-East Asia No. 4. Forages*. Pudoc Scientific Publishers, Wageningen, the Netherlands, p. 65–67.
- Sebillotte M., 1993. *L'agronome face à la notion de fertilité*, Natures-Sciences-Sociétés, p.128–141.
- Sebillotte M., 1982. *Les systèmes de culture*, in Séminaire du département d'agronomie de l'INRA, Vichy, France, p 26.
- Sédogo M.P., 1993. *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, 333p.
- Segalen P., 1967. *Les sols et la géomorphologie du Cameroun*, ORSTOM, Bandy, 46 p.
- Seguy L., 2001. *Rapport de mission au Cameroun*, Projet ESA, Garoua, 27 p.
- Seguy L., Bouzinac S., et Maronezzi A.C., 2001. *Un dossier du semis direct. Systèmes de culture et dynamique de la matière organique*. Cirad/AgronortePesquisas/Groupe MAEDA/ONG TAF/FOFIFA/ANAE, p. 18.
- Séguy L., Bouzinac S., 2000. *Un dossier du semis direct. Systèmes de culture sur couverture végétale, stratégies et méthodologie de la recherche-action, concepts novateurs de gestion durable de la ressource sol, suivi-évaluation et analyse d'impacts*, CIRAD-CA/GEC, 56 p.
- Seignobos C., 1993. *Hardé et Karal du Nord-Cameroun : Leur Perception par les Populations Agropastorales du Diamaré*, in *Les Terres Hardé, Caractérisation et Réhabilitation dans le Bassin du Lac Tchad*, Mémoires et Travaux de l'IRA No. 6, Cahiers Scientifiques No. 11, IRA-ORSTOM-CIRAD, Montpellier, p. 28.

- Seignobos C., 2011. *Les paysans du Nord du Cameroun face aux SCV en 2008*. IRD, France, 32p.
- Seiny-Boukar L., Pontanier R., 1993. *Hydrodynamique d'un sol Hardé du Nord-Cameroun ; caractéristiques et comportement*, CIRAD/ORSTOM/IRAD, Cahiers scientifiques N°11, p 12.
- Senaratne R. et Hardarson G., 1988. *Estimation of residual N effect of faba bean and pea on two succeeding cereals using ¹⁵N methodology*, Plant Soil 110: 81-89.
- Sharma H.K., Changte L. and Dolui A.K., 2001. *Traditional medicinal plants in Mizoram, India* Phytotherapy, 72: 146-161.
- Sheaffer C.C., Bames D.K. and Heichel G.H., 1989. *Annual alfalfa in crop rotations*, Station Bulletin 588-1989. Minnesota Agric. Exp. Stn. and Univ. of Minnesota St-Paul, Minnesota, p 15.
- SODECOTON, 2015. *Pluviométrie par pentade*, Garoua, Cameroun, 12 p.
- SODECOTON, 1991. *Rapports de la campagne agricole*, Garoua, Cameroun, 124 p.
- Soltner D., 2001 : *Les bases de la production végétale, Tome3, la plante et son amélioration*, 3^{ème} Ed., p 304.
- Solag, 2016. *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, 2 p.
- Steiner K.G., 1996. *Causes de la dégradation des sols et approches pour la promotion d'une utilisation durable des sols*. GTZ, Eschborn, Allemagne, 58 p.
- Tchuenteu F. et Mboning S., 2007. *Soil and plant common analyses*, Document N°8, Atelier de formation en techniques d'analyses des sols, eaux et engrais, du 19 au 23 mars 2007, Yaoundé, Cameroun, 58 p.
- Tendonkeng F., B. Boukila, E.T. Pamo, A.V. Mboko et J. Tchoumboué, 2010. *Effet de différents niveaux de fertilisation azotée sur le rendement et la composition chimique de Brachiaria ruziziensis à la montaison dans l'Ouest Cameroun*, Livestock Research for Rural Development, Volume 22, Article 19. Consulté le 12 Novembre 2018 sur le site <http://www.lrrd.org/lrrd22/1/tend22019.htm>, p 13.
- Treadwell D. D., and Alligood M., 2013. *Sunn hemp (Crotalaria juncea L.): a summer cover crop for Florida vegetable producers*. Publication #HS1126. University of Florida, IFAS Extension. <http://edis.ifas.ufl.edu/hs376> (accessed 26 July 2016), p 18.
- Tsozué D., Waga Mana P.B., Louléo J., 2016. *Use of no-till system on straw by cotton producers in Cameroon*, Science Domain International, 11 p.
- Tsozué D., Nghonda J.P., Mekem D.L., 2015. *Impact of land management system on crop yields and soil fertility in Cameroon*, Solid Earth, 15 p.

- Tsozué D., Haiwe B.R., Louleo J., Nghonda J.P., 2014. *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, 10 p.
- Tucker T. C. 1984. *Diagnosis of nitrogen deficiency in plants* in: Nitrogen in crop production, ASA-CSSA-SSSA Madison WI. USA, p 240-262.
- Turgeon B.G. et Bauer W.D., 1982. *Ultrastructure of infection-thread development during the infection of soybean by Rhizobium japonicum*, Planta, 163: 328-349
- UICN, 1990. *Ethiopian natural resources conservation strategy*, IUCN, Gland, p. 20.
- UNIFA, 2017. <http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes-html>.
- UNIFA, 2005. *Raisonnement de la fertilisation*. Parlons fertilisation, 5 p.
- Université Virtuelle Africaine, 2002. *Chimie de l'environnement*, p. 16-18.
- US Army, 1963. *Topographic map of Maroua, compiled from Carte de l'Afrique Centrale by corps of Engineers*.
- USDA-NRCS. 2015. *Sunn hemp (Crotalaria juncea L.)*, Plant Guide, 4p.
- USDA-NRCS, 2012. *The plants database*, National Plant Data Team, Greensboro, NC. <http://plants.usda.gov> (accessed 31 July 2016), p 8.
- USDA-NRCS. 2009. *'Tropic Sun' sunn hemp release brochure*. Hoolehua Plant Materials Center, Molokai, HI. <http://www.plant-materials.nrcs.usda.gov/pubs/hipmcrb8433.pdf> (accessed 31 August 2016), p 4.
- Valterra, 2013. *Dépollution et Réhabilitation des sols*, INRA, France, p 42.
- Van Leeuwen J. P., Lehtinen T., Lair G. J., Bloem J., Hemerik L., Ragnarsdottir K. V., Gísladóttir G., Newton J. S. and de Ruiter P. C., 2015. *An ecosystem approach to assess soil quality in organically and conventionally managed farms in Iceland and Australia*, Soil, 1: 83–101, doi:10.5194/soil-1-83-2015.
- Wang, K.H., and McSorley R., 2005. *Management of nematodes and soil fertility with sunn hemp cover crop*, Publication ENY-717, University of Florida, IFAS Extension, <http://edis.ifas.ufl.edu/ng043> (accessed 27 July 2018).
- Weh, 1973. *Les facteurs écologiques*, p. 37.
- Wery J., 1987. *Relation entre la nutrition azotée et la production chez les légumineuses*, Les colloques de l'INRA 37, Paris, France, p. 99-123.
- Wybrecht B. et Lavigne-Deville, 2002. *Les diagnostics, un outil pour le développement*, GRET, 72 p.
- Yerima K., 1988. *Principles of Soil Science*, 1st Edition, Dschang University, p. 2.

Annexes

Annexe 2 : Carte des sols du Cameroun, échelle 1 : 3250000 (Muller J.-P., 1979)



Annexe 3 : Poquets/ha et plants/ha de *Crotalaria juncea* à Kodek et Zouana

Parcelle/Donnée	Site de Kodek		Site de Zouana	
	Poquets/ha	Plants/ha	Poquets/ha	Plants/ha
C1	81575	156875	87850	175700
C1	87850	175700	89850	175700
C1	87850	163150	86575	169425
C1	87850	169425	87850	175700
Moyenne C1	86281	166287	87531	174131
C2	81575	156875	87850	175700
C2	87850	163150	87850	175700
C2	87850	163150	87850	175700
C2	94125	181975	87850	163150
Moyenne C2	87850	166287	87850	172562
C3	87850	175700	87850	175700
C3	87850	175700	87850	175700
C3	81575	156875	87850	175700
C3	81575	163150	87850	163150
Moyenne C3	84712	167856	87850	172562
C4	81575	156875	87850	175700
C4	87850	169425	87850	169425
C4	87850	144325	81575	150600
C4	87850	175700	87850	156875
Moyenne C4	86281	161581	86281	163150
Minimum	81575	144325	81575	150600
Maximum	94125	181975	87850	175700
Moyenne	86281	165503	87065	170601
Ecart-type	3622	9954	2143	8009
R²	0,100	0,060	0,143	0,315
F	0,444	0,254	0,667	1,836
Pr > F	0,726	0,857	0,588	0,194

Annexe 4 : Taille des plants de *Crotalaria juncea* à 90 JAS (10 plants par parcelle)

Répétitions	No plant	Kodek	Zouana
		Taille (m)	Taille (m)
C 1	1	2,80	2,78
	2	2,70	2,40
	3	2,97	2,62
	4	2,86	2,15
	5	2,75	2,40
	6	2,62	2,50
	7	2,64	2,50
	8	2,72	2,43
	9	2,72	2,43
	10	2,72	2,30
		Moyenne	2,75
C 2	1	3,09	2,80
	2	2,56	2,33
	3	2,64	2,02
	4	2,56	2,73
	5	2,84	1,84
	6	2,56	2,31
	7	2,74	2,60
	8	2,85	2,40
	9	2,72	2,18
	10	2,80	2,30
		Moyenne	2,74
C 3	1	2,70	2,35
	2	3,16	2,65
	3	2,70	2,10
	4	2,88	2,25
	5	2,58	2,27
	6	2,82	2,50
	7	3,24	2,05
	8	3,02	2,40
	9	3,10	2,57
	10	2,87	2,05
		Moyenne	2,90
C 4	1	2,65	2,30
	2	2,63	2,27
	3	2,80	2,37
	4	3,15	2,60
	5	2,60	2,63
	6	3,10	2,70
	7	3,00	2,38
	8	2,90	2,70
	9	2,70	2,60
	10	3,10	2,70
		Moyenne	2,86
Minimum		2,560	1,840
Maximum		3,240	2,800
Moyenne		2,814	2,412
Ecart-type		0,190	0,228
R²		0,151	0,131
F		2,133	1,815
Pr > F		0,113	0,162

Article publié relatif à la présente thèse

Hinimbio T.P., Madi A., Mvondo Awono J.P., 2018. *Réponse du maïs aux effets de réhabilitation de la fertilité des sols liés à la légumineuse *Crotalaria juncea* L. au Nord-Cameroun*, Afrique Science 14(4) : 423 – 438, ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.net>, Abidjan, Côte d’Ivoire, 16 p.