



REPUBLIQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI



ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Effets des pratiques culturales sur la dégradation du sol au niveau des bassins versants du sud Bénin



Pr. Dr. Ir. Philippe LALEYE

THESE DE DOCTORAT

Défendue le 14 mars 2016 par

Ir. Félix KOUÉLO ALLADASSI

En vue de l'obtention du grade de **Docteur en Sciences Agronomiques**

Spécialité : Conservation des Sols et des Eaux

Option : Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures

Promoteur : **Dr Ir. Pascal HOUNGNANDAN**

Maître Conférences en Microbiologie des Sols et Nutrition des plantes (CAMES)
Faculté des Sciences Agronomiques, UAC, Bénin

Co-Promoteur : **Dr Ir. Anastase H. AZONTONDE**

Maître de Recherche en Agro-Pédologie (CAMES)
Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, INRAB, Bénin

Mars, 2016



REPUBLIQUE DU BENIN

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI



ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

Effets des pratiques culturales sur la dégradation du sol au niveau des bassins versants du sud Bénin



THESE DE DOCTORAT

Défendue le 14 mars 2016 par :

Ir. Félix KOUELO ALLADASSI

En vue de l'obtention du grade de **Docteur en Sciences agronomiques**

Spécialité : Conservation des Sols et des Eaux

Option : Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures

Promoteur : Dr. Ir. Pascal HOUNGNANDAN

Maître Conférences en Microbiologie des Sols et Nutrition des plantes (CAMES)

Faculté des Sciences Agronomiques, UAC, Bénin

Co-Promoteur : Dr. Ir. Anastase H. AZONTONDE

Maître de Recherche en Agro-Pédologie (CAMES)

Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, INRAB, Bénin

Mars, 2016



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES (FSA)



ECOLE DOCTORALE EN SCIENCES AGRONOMIQUES

Effets des pratiques culturales sur la dégradation du sol au niveau des bassins versants du sud Bénin

Félix KOUELO ALLADASSI

Thèse défendue pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques de
l'Université d'Abomey-Calavi.

Spécialité : Conservation des Sols et des Eaux

Option : Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures (RPPC)

Composition du jury

Président

Euloge AGBOSSOU, Professeur Titulaire, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Directeur de thèse

Pascal HOUNGNANDAN, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Rapporteurs

Aliou SAIDOU, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Moncef BENMANSOUR, Docteur, Chef Division Eau-Sol-Climat, CNESTEN
Rabat (Maroc)

Jean-Marie Karimou AMBOUTA, Professeur titulaire, Université d'Abdou
Moumouni de Niamey (Niger)

Examineur

Anastase AZONTONDE, Maître de Recherches, INRAB, Bénin

Pré-Rapporteurs

Jean-Marie Karimou AMBOUTA, Professeur titulaire, Université d'Abdou
Moumouni de Niamey (Niger)

Aliou SAIDOU, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Moncef BENMANSOUR, Docteur, Chef Division Eau-Sol-Climat, CNESTEN
(Maroc)

Comité de thèse

Rigobert TOSSOU, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Guillaume AMADJI, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi, Bénin

Anastase H. AZONTONDE, Maître de Recherches, INRAB, Bénin

Pascal HOUNGNANDAN, Maître de Conférences, Université d'Abomey-Calavi,
Bénin

Pour citer le document

Kouelo, A. F., 2016. Effets des pratiques culturales sur la dégradation du sol au niveau des bassins versants du sud Bénin. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 230 pages.

A la mémoire de mon père Feu Gandohounto Alladassi KOVELO
A la mémoire de ma tante Feue Mahinou GANDOTE
A ma mère Bahangnansi Hohonon ETOKO
A tous mes enfants, en occurrence
Juste Adi-gbèdoto et Espoir Tonan

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de thèse est le résultat d'un travail mené au sein du Laboratoire de Microbiologie des Sols et d'Ecologie Microbienne de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (LMSEM/FSA/UAC). Le travail a nécessité des collaborations avec d'autres centres de recherche en particulier le Centre National de l'Energie, des Sciences et Technologie Nucléaire de Rabat au Maroc (CNESTEN).

La présente thèse a été dirigée par Monsieur Pascal HOUNGNANDAN (Maître Conférences du CAMES) et co-dirigé par Monsieur Anastase Hessou AZONTONDE (Maître de Recherches du CAMES). Elle a été financée par une bourse doctorale nationale accordée par le gouvernement du Bénin. Les essais sur le terrain ont été financés par le Laboratoire de Microbiologie des Sols et d'Ecologie Microbienne. Les travaux de laboratoire ont été financés en espèce et en nature par le projet CRP D1 5012 « Soil Quality and Nutrient Management for Sustainable Food Production in Mulch-based Cropping Systems in Sub-Saharan Africa » et le projet RAF 5063 « Supporting Innovative Conservation Agriculture Practices to Combat Land Degradation and Enhance Soil Productivity for Improved Food Security » de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA).

REMERCIEMENTS

Eh bien voilà, c'est terminé ou presque...

Cette thèse est non seulement l'aboutissement d'un long parcours mais aussi celui d'un réel travail d'équipe. Pour ces deux raisons, j'aimerais n'oublier personne au cours de ces quelques lignes.

Je tiens tout d'abord à remercier mes parents, qui ont fini par accepter m'inscrire à l'école à l'âge de sept ans à cause de mes fréquentes crises de drépanocytose. Vous m'avez soutenu et encouragé durant toute la vie scolaire et universitaire. Vous m'avez toujours donné la force de lutter contre mes crises et la joie de vivre après mes nombreux accidents, le premier durant ma première année de l'école et le dernier, la dernière année de mon dernier diplôme (cette thèse de doctorat) il y a quelques mois. Vous m'avez aidé à montrer aux habitants de notre village que le drépanocytaire peut vivre longtemps, peut tout faire et à les mêmes droits que tout le monde. Soyez-en bénit sur la terre comme au ciel. J'en profite pour remercier le Directeur de l'EPP de Gnizinta d'alors M. Vincent AFFOIGNON pour son soutien. Je n'oublie pas mes frères et sœurs qui ont tout donné pour ma survie et ma réussite. Quelques mots également pour ma chère Marthe Trinité MEHOU pour toutes les épreuves et pour ton implication effective dans mes travaux de thèse du début jusqu'à la fin. La thèse ne sera plus une raison pour quoi que ce soit. Je présente toutes mes excuses à mes enfants pour mes absences répétées et pour toutes les souffrances que je leur ai infligées à cause de cette thèse.

Finaliser une thèse, pour un apprenti-chercheur, c'est également le résultat d'un bon encadrement. Si la possibilité m'était donnée de recommencer ce travail, je le ferai avec la même équipe d'encadrement sous la direction de la même personne.

Je tiens à témoigner ma gratitude à mon Directeur de thèse, Monsieur Pascal HOUNGNANDAN pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire depuis ma formation d'Ingénieur Agronome, pour la confiance qu'il a eu en moi au moment de me confier ce travail de thèse et pour m'avoir permis d'aller au bout de ma formation universitaire. Merci de m'avoir fait profiter de votre formidable esprit de synthèse et de votre pertinence scientifique qui ont grandement contribué à ce travail. Un énorme merci à vous pour tout le temps passé avec moi, sur le terrain ou au labo, et pour bien plus encore. Enfin, je vous suis très reconnaissant pour toute ma formation et renforcement de capacité sur la conservation des sols, l'évaluation des terres et sur l'utilisation des traceurs radioactifs à travers les projets de coopération de l'AIEA.

Mes sincères remerciements à mon co-Directeur de thèse, Monsieur Anastase H. AZONTONDE pour avoir accepté m'accompagner dans cette aventure. Vous avez été d'un appui scientifique indispensable à la réalisation de ce mémoire. Merci pour vos innombrables conseils notamment méthodologiques, votre rigueur, votre disponibilité et pour vos coups de fil d'encouragement.

Je remercie tous les membres du comité de ma thèse pour leurs contributions méthodologiques et scientifiques à la réalisation de ce travail. Il s'agit de Messieurs

Rigobert TOSSOU, Maître de Conférences et Guillaume AMADJI, Maître de Conférences tous Enseignant-Chercheur à la FSA.

Je remercie également Monsieur Houinsou DEDEHOUANOU, Maître de Conférences pour sa disponibilité à apporter sa touche méthodologique à la collecte des données et à la publication des résultats. Recevez mes sincères reconnaissances.

Je suis très reconnaissant aux Messieurs Lionel MABIT, Moncef BENMANSOUR, Naivo RABESIRANANA, Abdou N'DIATH et toutes les équipes des projets RAF 5063 et CRP D1 5012 de l'AIEA pour leurs conseils, leurs appuis techniques et scientifiques à mes travaux de thèse.

Merci à tous les Enseignants de la FSA et surtout du Département de Production Végétale pour leur collaboration et leurs conseils, en occurrence Messieurs Aliou SAIDOU, Maître de Conférences et Léonard AHOTON, Maître de Conférences.

Merci aussi à tous mes collègues Chercheurs de la Faculté des Sciences Agronomiques pour la vie corporative et surtout Monsieur MAMA Adi pour l'aide à la réalisation des cartes des bassins versants.

Quelques mots de remerciements à l'endroit des membres du Conseil Scientifique de l'UAC et de la Commission Nationale des Bourses et Stages pour leur soutien administratif.

Merci aux collaborateurs du laboratoire, thésards et stagiaires, avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à échanger notamment Charlotte ZOUNDJI, Oscar DIDAGBE, Anselme TCHETANGNI, Aimé AHEKO et particulièrement à Moriaque AKPLO pour son apport technique important à la collecte des données. Merci aussi à tous mes amis Ibrahim BALOGOUN, Bello DAOUDA, Emile PADONOU et consorts pour leurs soutiens.

Une thèse, c'est aussi la chance pour un doctorant de pouvoir travailler avec de jeunes stagiaires et techniciens. Je remercie donc tous ceux qui ont apporté leur pierre à l'édifice : Joël BEKOU, Cyprien TOMAVO, Synauque ZANVO, Leslie BOSSOU, Nadine ZOUNTANGNI, Estelle KANHOUNNON, Maxime AGBADO, Oslo GANGNON, Rose GLADJA, Firmin OUSSOU, Marilyse KOKOYE, Rodrigue ADJE, Serge DOSSOUGOUIN, Arnaud GANGBIGBA.

Qu'il me soit maintenant permis de remercier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail.

Enfin, je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire. Toutes mes excuses pour ne pouvoir les nommer tous.

SOMMAIRE

DEDICACE

AVANT-PROPOS

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

RESUME

ABSTRACT

INTRODUCTION GENERALE

1- Problématique

2- Description de la zone d'étude

3- Structuration de la thèse

CHAPITRE 1 : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PRATIQUES CULTURALES ET LA DEGRADATION DES SOLS

1-1-Définition et opérationnalisation des concepts

1-2- Pratiques culturelles et dégradation des terres

1-3- Pratiques culturelles et érosion hydrique du sol

1-4- Evaluation de l'érosion hydrique

CHAPITRE 2 : PRATIQUES CULTURALES ET DEGRADATION DES SOLS

2-1- Contexte

2-2- Méthodes

2-3- Résultats

2-4- Discussion

2-5- Conclusion partielle

CHAPITRE 3 : ETAT DE LA DEGRADATION DU SOL

3-1- Mesures physiques

3-2- Techniques de retombées radionucléides

3-3- Conclusion partielle

CHAPITRE 4 : EFFET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DEGRADATION DU SOL

4-1- Erosion du sol

4-2- Productivité du maïs

4-3- Conclusion partielle

CHAPITRE 5 : DISCUSSION GENERALE

5-1- Rappel des questions et des hypothèses de recherches

5-2- La perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

5-3- Les pratiques culturales des agriculteurs sur les bassins versants

5-4- Etat de la dégradation du sol

5-5- Le travail du sol et le mulching dans la lutte contre la dégradation du sol

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

TABLE DES MATIERES

ANNEXES

LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS

α :	Alpha
β^- :	Beta
γ :	Gamma
λ :	Lambda
^{109}Cd :	Cadmium 109
^{113}Sn :	Etain 113
^{134}Cs :	Césium 134
^{137}Cs :	Césium 137
^{139}Ce :	Cérium 139
^{210}Pb :	Plomb 210
$^{210}\text{Pbex}$:	Plomb 210 en excès
^{214}Am :	Américium 214
^{214}Bi :	Bismuth 214
^{214}Pb :	Plomb 214
^{222}Rn :	Radon 222
^{226}Ra :	Radium 226
^{40}K :	Potassium 40
^{51}Cr :	Chrome 51
^{57}Co :	Cobalt 60
^{60}Co :	Cobalt 60
^7Be :	Béryllium 7
^{85}Sr :	Strontium 85
A:	Perte en sol
AE:	Allowable Error
AIEA:	Agence Internationale de l'Energie Atomique
an:	Année
ANOVA:	Analysis of Variance
B:	Billonnage
BM:	Billonnage et mulch
BM0:	Billonnage et sans mulch
BPA :	Bonnes Pratiques Agricoles
C :	Modalité d'utilisation
C/N :	Carbone/Azote
Ca:	Calcium
Ca²⁺:	Ion Calcium
CAMES :	Conseil Africain et Malgache de l'Enseignement Supérieur
CARDER :	Centre d'Action Régional Pour le Développement Rural
CEC :	Capacité d'Echange Cationique

CeRPA :	Centre Régional de la Promotion Agricole
CNESTEN :	Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires
Corg:	Carbone Organique
Cr³⁺:	Ion chromate
Cs⁺ :	Ion Césium
CV :	Coefficient de Variation
Ec:	Energie Cinétique
ETP:	Evapotranspiration Potentielle
FAO :	Fond des Nations-Unies pour l'Agriculture et l'Alimentation
FIDA:	Fonds International de développement agricole
FSA:	Faculté des Sciences Agronomiques
H₂SO₄ :	Acide Sulfurique
hab :	Habitant
IFS :	International Foundation of Sciences
IITA :	International Institut of Tropical Agriculture
INRAB :	Institut National des Recherches Agronomiques
INSAE:	Institut National de la Statistique et l'Analyse Economique
j:	Jour
JAS:	Jour Après Semis
K :	Indice de sensibilité des sols
K:	Potassium
K⁺ :	Ion Potassium
Kcl:	Chlorure de Potassium
L :	Longueur de pente
LP:	Labour à plat
LPM:	Labour à plat et mulch
LPM0:	Labour à plat et sans labour
M0:	Sans Mulch
M60:	Mulch à 60% de taux de couverture
MAEP:	Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche
MES :	Matière en suspension
Mg:	Magnésium
Mg²⁺:	Ion Magnésium
ML:	minimum Labour
MLM:	Minimum labour et Mulch
MO:	Matière Organique
Ms:	Matière sèche
MUSLE:	Modifed USLE
n:	Taille de l'échantillon
N:	Azote
N0:	Sans azote

N120:	Azote à 120Kg d'unité fertilisante par hectare
NaOH :	Hydroxyde de Sodium
nBa :	Nanobar
NH3 :	Amoniac
NPK:	Azote Phosphore Potassium
ns:	Non significatif
Nt :	Azote total
ONG:	Organisation non Gouvernementale
OP:	Organisation Paysanne
P :	Facteur de correction en fonction des pratiques antiérosives
P :	Phosphore
P₂O₅ :	Unité fertilisante de phosphore
PADC :	Programme d'Appui au Développement des Communes
PDC:	Plan de Développement Communal
PO₄³⁻ :	Ion Phosphate
ppds :	Plus Petite Différence Significative
Pt :	Phosphore total
R :	Indice d'agressivité des pluies
r:	Coefficient de régression de Pearson
RAMR :	Recherche Appliquée en Milieu Réel
RGPH3 :	Troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitat
RPPC :	Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures
RUSLE:	Revised Universal Soil Loss Equation
S:	Inclinaison
SAA :	Spectromètre à Absorption Atomique
SAP:	Système Amélioré de Production
SAS:	Statistic Analysis System
SCDA:	Secteur Communal pour le Développement Agricole
SIG :	Système d'Information Géographique
SL:	Sans labour
SLM:	Sans labour et Mulch
SLM0:	Sans Labour et Sans Mulch
SOM:	Soil Organic Matter
T1/2 :	Temp de demi-vie
UAC:	Université d'Abomey-Calavi
USLE:	Universel Soil Loss Equation
USLE-M:	USLE Modified
V:	Vitesse

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	: Caractéristiques des variables	43
Tableau 2	: Caractéristiques sociales des agriculteurs enquêtés	44
Tableau 3	: Caractéristiques démographiques des agriculteurs enquêtés	45
Tableau 4	: Caractéristiques éducatives et institutionnelles des agriculteurs enquêtés	46
Tableau 5	: Les déterminants de la perception des agriculteurs sur la dégradation du sol	48
Tableau 6	: Les déterminants de l'appréciation de la productivité des sols par les agriculteurs	50
Tableau 7	: Les déterminants des causes de la baisse de la productivité des sols vues par les agriculteurs du Sud Bénin	53
Tableau 8	: Les déterminants des causes de la perte de terre selon les agriculteurs	55
Tableau 9	: Pratiques de préparation du sol	57
Tableau 10	: Pratiques de fertilisation	58
Tableau 11	: Pratiques de gestion des cultures	59
Tableau 12	: Pratiques de protection des cultures	60
Tableau 13	: Modèle Probit d'estimation des facteurs sociodémographiques qui influencent l'adoption des pratiques culturelles	62
Tableau 14	: Effet des pratiques culturelles sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Govié	85
Tableau 15	: Effet des pratiques culturelles sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Lokogba	86
Tableau 16	: Effet des pratiques culturelles sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Linsinlin	87
Tableau 17	: Les paramètres locaux de conversion du model MBM2	103
Tableau 18	: Les activités de référence du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$	104
Tableau 19	: Evaluation de la redistribution du sol et du budget du sédiment à partir du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ sur les bassins versants de Govié, de Lokogba et de Linsinlin	108
Tableau 20	: Les caractéristiques physiques des sols des sites d'études	116
Tableau 21	: Les caractéristiques chimiques des sols des sites d'études	116
Tableau 22	: Effet du labour et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Govié	117
Tableau 23	: Effet du labour et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Lokogba	117
Tableau 24	: Effet du labour et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Linsinlin	118

Tableau 25	: Effet du labour et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Govié	124
Tableau 26	: Effet du labour et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Lokogba	125
Tableau 27	: Effet du labour et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Linsinlin	126
Tableau 28	: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les paramètres de croissance des plants du maïs	148
Tableau 29	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la croissance des plants du maïs	149
Tableau 30	: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la productivité du maïs.	151
Tableau 31	: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote du maïs	154
Tableau 32	: Effet du travail du sol et du mulching sur la croissance des plants de maïs	157
Tableau 33	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'indice foliaire et la vitesse de croissance des plants du maïs	158
Tableau 34	: Effet du travail du sol et du mulching sur les paramètres de rendement du maïs	160
Tableau 35	: Effet du travail de sol et du mulching sur le rendement en azote des composantes de rendement du maïs	163
Tableau 36	: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la croissance des plants de maïs	166
Tableau 37	: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les composantes du rendement de maïs	169
Tableau 38	: Effet du travail de sol et du mulching sur le rendement en azote des composantes de rendement du maïs	172

LISTE DES FIGURES

Figure 1	: Carte de situation géographique de la zone d'étude	6
Figure 2	: Diagramme climatique de la commune d'Allada, période de 2004 à 2014	7
Figure 3	: Diagramme climatique de la commune d'Aplahoué, période de 2004 à 2014	8
Figure 4	: Diagramme climatique de la commune de Djidja, période de 2004 à 2014	10
Figure 5	: Schéma d'un bassin versant	15
Figure 6	: Les étapes du processus de l'érosion	20
Figure 7	: Le phénomène du détachement et du splash	21
Figure 8	: Le phénomène du détachement et du splash en milieu réel	21
Figure 9	: Modes de transport par ruissellement	23
Figure 10	: Diagramme de Hjulström	24
Figure 11	: Perception de la dégradation du sol par les agriculteurs	47
Figure 12	: Appréciation de la productivité des sols par les agriculteurs	49
Figure 13	: Causes de la baisse de la productivité des sols selon les agriculteurs	51
Figure 14	: Causes de la perte de terre selon les agriculteurs	54
Figure 15	: Carte du bassin versant de Govié	71
Figure 16	: Carte du bassin versant de Lokogba	71
Figure 17	: Carte du bassin versant de Linsinlin	72
Figure 18	: Carte de l'arrondissement de Togoudo montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Govié	73
Figure 19	: Carte de l'arrondissement d'Aplahoué montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Lokogba	74
Figure 20	: Carte de l'arrondissement de Dan montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Linsinlin	75
Figure 21	: Prélèvement d'échantillon du sol avec un carotier sur un transect	76
Figure 22	: Section d'un échantillon du sol pour l'étude de profil	76
Figure 23	: Effet des pratiques culturales sur la densité apparente du profil du sol sur le bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)	80
Figure 24	: Effet des pratiques culturales sur la biomasse racinaire du profil du sol sur le bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)	81

Figure 25	: Effet des pratiques culturales sur la densité apparente le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba B) et de Linsinlin (C)	83
Figure 26	: Effet des pratiques culturales sur la biomasse racinaire le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba B) et de Linsinlin (C)	84
Figure 27	: Effet des pratiques culturales sur la teneur en azote du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)	88
Figure 28	: Effet des pratiques culturales sur la teneur en phosphore assimilable du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)	90
Figure 29	: Effet des pratiques culturales sur la teneur en matière organique du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)	92
Figure 30	: Le cycle des retombées des radioéléments étudiés	96
Figure 31	: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Govié montrant les points d'échantillonnage.	97
Figure 32	: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Govié montrant les points d'échantillonnage	97
Figure 33	: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Lokogba montrant les points d'échantillonnage	97
Figure 34	: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Lokogba montrant les points d'échantillonnage	98
Figure 35	: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Linsinlin montrant les points d'échantillonnage	98
Figure 36	: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Linsinlin montrant les points d'échantillonnage	99
Figure 37	: Spectre d'analyse d'échantillon par Spectrométrie gamma	100
Figure 38	: La calibration de l'efficacité du système de détection	101
Figure 39	: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Govié	105
Figure 40	: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Lokogba	106
Figure 41	: Inventaire et distribution du Plomb en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Lokogba	106

Figure 42	: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Linsinlin	107
Figure 43	: Inventaire et distribution du Plomb en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) dans le profil du sol du site de référence de Linsinlin	107
Figure 44	: Parcelle d'érosion dans un champ de maïs sur le bassin versant de Linsinlin	114
Figure 45	: Gouttière de collecte des eaux de ruissellement	114
Figure 46	: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Govié	119
Figure 47	: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Govié	119
Figure 48	: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Lokogba	120
Figure 49	: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Lokogba	121
Figure 50	: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Linsinlin	121
Figure 51	: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Linsinlin	122
Figure 52	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en azote par érosion au niveau du bassin versant de Govié	127
Figure 53	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Govié	128
Figure 54	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du potassium par érosion au niveau du bassin versant de Govié	128
Figure 55	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Govié	129
Figure 56	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Govié	129
Figure 57	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Govié	130
Figure 58	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en Azote par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	130
Figure 59	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	131
Figure 60	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Potassium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	132

Figure 61	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	133
Figure 62	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	134
Figure 63	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba	135
Figure 64	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en Azote par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	136
Figure 65	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	137
Figure 66	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Potassium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	138
Figure 67	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	139
Figure 68	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	140
Figure 69	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin	141
Figure 70	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements grains et paille du maïs	152
Figure 71	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements rafles et spathes du maïs	152
Figure 72	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'indice de récolte du maïs	153
Figure 73	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs	155
Figure 74	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des rafles et des spathes du maïs	155
Figure 75	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des composantes du rendement de maïs	156
Figure 76	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur le diamètre au collet des plants du maïs	158
Figure 77	: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur le nombre de feuilles par plants du maïs	159
Figure 78	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur les rendements grains et pailles du maïs	161
Figure 79	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur les rendements rafles et spathes du maïs	162

Figure 80	: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur l'indice de récolte du maïs	162
Figure 81	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs	164
Figure 82	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'accumulation en azote des rafles et des spathes du maïs	164
Figure 83	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la répartition de l'azote dans les composantes du rendement de maïs	165
Figure 84	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur le diamètre au collet des plants du maïs sur le bassin versant de Linsinlin	166
Figure 85	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la vitesse de croissance des plants du maïs sur le bassin versant de Linsinlin	167
Figure 86	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur le nombre de feuilles par plant du maïs sur le bassin versant de Linsinlin	167
Figure 87	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la surface foliaire des plants du maïs sur le bassin versant de Linsinlin	168
Figure 88	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements grains et pailles du maïs	170
Figure 89	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements rafles et spathes du maïs	170
Figure 90	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'indice de récolte du maïs	171
Figure 91	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs	173
Figure 92	: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des rafles et des spathes du maïs	173
Figure 93	: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la répartition de l'azote dans les composantes du rendement de maïs	174

RESUME

La pression foncière causée par la croissance démographique galopante et l'urbanisation contraint les petits agriculteurs à s'installer sur les bassins versants qu'ils surexploient avec des pratiques culturales inappropriées. La présente étude a permis d'analyser l'effet des pratiques culturales sur la dégradation des sols dans trois bassins versants au niveau des villages de Govié, de Lokogba et de Linsinlin, respectivement dans les communes d'Allada, d'Aplaoué et de Djidja. Une enquête sur 417 ménages agricoles représentés par leur chefa permis d'inventorier et d'analyser les savoirs locaux des agriculteurs sur la dégradation des sols et de caractériser leurs pratiques culturales. Des échantillons de sols ont été prélevés sur six transects à raison de deux par bassin versant, parallèles et orientés dans le sens de la pente. L'analyse physico-chimique et radiométrique (à l'aide des traceurs radioactifs ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) a permis d'évaluer l'état de la dégradation des sols ces dernières décennies. Les pratiques de conservation des sols ont été identifiées. Leurs contributions à la lutte contre la dégradation physique et chimique des sols et à l'amélioration de la productivité du maïs ont été étudiées à travers des essais en milieu paysan sous gestion Chercheur. Les résultats ont montré que les agriculteurs ont une bonne compréhension du phénomène de la dégradation des sols et une très bonne connaissance des causes. La baisse de la productivité des sols et les pertes de terre sont les principales causes de la dégradation. A cet effet, ils ont adopté plusieurs pratiques culturales dont celles dégradantes des sols (le défrichement avec brûlis par 91% des ménages agricoles de Linsinlin, le billonnage parallèle à la pente par 37% des ménages agricoles de Linsinlin, la culture continue et la monoculture par tous les ménages agricoles de Lokogba). Cependant, quelques pratiques de conservation des sols sont observées chez certains agriculteurs (le défrichement sans brûlis par 50% des ménages agricoles de Govié, le semis direct par 48% des ménages agricoles de Lokogba, le billonnage en courbe de niveau par 41% des ménages agricoles de Govié). Les sols des bassins versants sont compacts (1,91 g/cm²) et ont une très faible teneur en azote total (0,028%), phosphore assimilable (1,13ppm), matière organique (0,63%) et en biomasse racinaire (0%). Avec les traceurs radioactifs (^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$), le taux de dégradation varie d'un bassin versant à un autre. Le bassin versant de Lokogba est le plus dégradé avec 15 à 17 tonnes/ha/an de terres perdues avec de nutriments. Le labour à plat combiné avec du mulching a réduit complètement les effets de l'érosion des sols dans le bassin versant de Govié. A Lokogba, le zéro labour et le billonnage combinés au mulching sont efficaces dans la lutte contre la dégradation des sols. Dans le bassin versant de Linsinlin, l'érosion des sols est totalement réduite par le billonnage en courbe de niveau combiné avec du mulching. Ces pratiques ont amélioré aussi les performances agronomiques du maïs, surtout le rendement grains (2,3 ; 2,8 et 4,1 t MS/ha respectivement à Govié ; Lokogba et Linsinlin). Les résultats de la présente étude constitueront des outils de sensibilisation, de communication et de formation pour les producteurs et les décideurs de la politique agricole pour la rehabilitation des sols.

Mots clés : Fertilité des sols, Perception paysanne, Erosion hydrique, Traceurs radioactifs, Productivité du maïs, Bénin.

ABSTRACT

In Benin, especially in the south, rapid population growth (200 to 400 inhabitants/km²) resulted in high pressure on land by reducing the size of farms, suppressing fallows and causing soil degradation. The present study aims to analyze the effects of farming practices on soil degradation in three watersheds of southern Benin. A base line survey with 417 respondents enabled to assess and analyse farmers' local knowledge on soil degradation and characterization of farming practices. For that purpose, three watersheds sites were selected in the south of Benin. Eighty-four (84) soil samples were collected following transect lines. Physical, chemical and radiometric analysis (¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{exc}) were used to assess the level of soil degradation during the recent decades. Farmers' soil conservation practices that reduce physical and chemical soil degradation and improve maize's productivity were studied through on-farm trials under researcher's management. The results showed that farmers have good understanding of soil degradation and a very good knowledge of its causes. Declining of soil productivity and soil losses are the main factors causing soil degradation. They have adopted several farming practices some of them cause soil degradation. However, some conservation tillage practices were observed among some farmers. Soils of the watersheds are more compact and have a very low total nitrogen, available phosphorus and organic matter content. These soils produce low plant root biomasses. With radionuclides (¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{exc}), watershed of Lokogba is the most degraded site with 15 to 17 tons.ha⁻¹.year⁻¹ of soil and nutrient losses. Tillage combined with mulching completely reduced soil erosion and improved maize yield in the watershed of Govié. In watershed of Lokogba, zero tillage and ridging combined with mulching are effective to reduce soil degradation. In the watershed of Linsinlin, soil erosion is completely reduced by ridging across slope combined with mulching. They also improved agronomic performance of maize, particularly grain yields up to 2.3; 2.8 and 4.1 DM t ha⁻¹ respectively at Govié, Lokogba and Linsinlin. The present results could be used as awareness, communication and agricultural training tools development for decision makers in the agricultural sector for soil rehabilitation.

Keywords: Soil fertility, Farmer perception, Farming practices, Water erosion, radioactive tracers, Maize productivity, Benin.

Le sol est essentiel aux hommes, les usages qu'ils en font pouvant être d'ordre agricole, forestier, industriel, urbain, mais aussi d'ordre écologique. Il n'y a pas de développement des sociétés sans utilisation des sols.

Alain Ruellan

INTRODUCTION GENERALE

1- PROBLEMATIQUE

Les systèmes actuels de production et de distribution des produits alimentaires ne réussissent pas à nourrir le monde. On estime que le nombre total de personnes souffrant de sous-alimentation en 2010 s'élève à 925 millions d'individus, soit plus qu'il y a quarante ans. Dans l'ensemble des pays en développement, la prévalence de la sous-alimentation se chiffre à 16% de la population totale (FAO, 2010). Environ 75% des personnes les plus touchées vivent dans les zones rurales des pays en développement et dépendent directement ou indirectement de l'agriculture pour leurs moyens d'existence (FAO, 2009). On compte, dans leurs rangs, un bon nombre de demi-milliard de petits agriculteurs pauvres et leurs familles, qui produisent 80% des disponibilités alimentaires dans les pays en développement. Ensemble, les petits agriculteurs utilisent et gèrent plus de 80% des terres agricoles en Asie et en Afrique (FIDA, 2010). La bonne productivité des sols est essentielle pour la durabilité de l'agriculture, la sécurité alimentaire et les conditions de vie des populations pauvres (OCDE, 2009).

Résultats de l'interaction complexe entre le climat, la géologie, la végétation, l'activité biologique, le relief, le temps et l'utilisation des terres, le sol est une ressource non renouvelable. Alors que les processus de formation et de régénération des sols sont extrêmement lents (plusieurs milliers d'années), certaines activités humaines peuvent dégrader les sols en quelques années ou décennies. Parmi les menaces les plus préoccupantes, on peut citer la diminution des taux de matières organiques, l'érosion, la contamination par des substances polluantes, l'imperméabilisation, le tassement, la réduction de la biodiversité, la salinisation, les inondations et les glissements de terrain (ADEME, 2011). La croissance rapide de la population et la longue histoire de la sédentarisation de l'agriculture ont changé le mode d'utilisation des terres et ont été la cause principale de la dégradation de l'environnement dans la plupart des pays du monde (Feoli *et al.*, 2002). L'intensification de l'agriculture et la spécialisation des productions agricoles ont provoqué une pression accrue sur les sols. Cette pression s'est généralement traduite par une détérioration accélérée de cette ressource naturelle par le biais de l'érosion hydrique (Mabit *et al.*, 2002). Malheureusement, au niveau mondial, la dégradation des sols a pris une ampleur considérable. Chaque année, 5 à 7 millions d'hectares de surfaces arables disparaissent. Dans le contexte actuel de forte croissance démographique et de pression accrue sur les ressources, les sols tropicaux sont particulièrement menacés (Grosclaude *et al.*, 2006). Les systèmes de production traditionnels n'arrivent plus à maintenir la fertilité et la capacité de production des sols (Séguy, 2006). Aujourd'hui les questions liées à la gestion de la fertilité des sols occupent le centre des débats sur la durabilité des systèmes de production agricole en Afrique, et particulièrement en Afrique au sud du Sahara. Les agriculteurs s'inquiètent par rapport à la « fatigue des sols », les

éleveurs par rapport à la faible productivité des pâturages. Les techniciens s'interrogent sur les raisons de la baisse des rendements et sur les capacités réelles du système en cours à satisfaire les besoins actuels et croissants des générations futures (Kouélo, 2011).

Au Bénin, la pauvreté apparaît beaucoup plus comme un phénomène rural, dans un contexte économique principalement caractérisé par la prépondérance du secteur agricole. De ce fait, les pauvres sont aujourd'hui bien plus nombreux en zones rurales qu'en zones urbaines (MAEP, 2011). Les plus pauvres n'ayant que le sol qu'ils surexploitent pour subvenir à leurs besoins (de chauffage, d'alimentation). Ainsi les ressources naturelles (eau, sol et végétation) sont fortement dégradées, hypothéquant le développement agricole et par conséquent la sécurité alimentaire (ECOWAP, 2005). L'accès à la terre pose problème, notamment dans le sud du pays : les parcelles cultivables ont une superficie moyenne de 1,7 hectares pour une famille de 6 à 7 personnes et les activités non agricoles restent rares (FIDA, 2006). Dans cette zone méridionale du Bénin, les sols ferrallitiques appelés « terre de barre » sont les plus dominants, 60% de la surface du sud-Bénin, et les plus exploités dans le pays (Azontondé, 2000). Ils couvrent 7% de la superficie totale du pays mais concentrent près de 30% de la population nationale avec des densités de plus de 400 habitants/km² contre une moyenne nationale de 58 habitants/km². Ils sont situés sur une série de plateau de relief plat à ondulé : Plateau d'Allada, d'Abomey, d'Aplahoué, de Kétou, de Bopa, de Sakété et de Zagnanado. Le problème du maintien de la fertilité de ces sols se pose dès leur mise en culture. La jachère n'existe pratiquement plus conduisant à des crises alimentaires répétées (ASSOGBA, 2007). Ces crises proviennent de l'insuffisance de la production vivrière à satisfaire les besoins de la population en croissance. Cette insuffisance de production, conséquence de la baisse de la fertilité des terres de barre est due à des facteurs climatiques mais surtout agronomiques (Djègui, 1982 cité par Kouélo, 2004). En effet, les fortes pluies et la forte réduction de couverture des sols occasionnent une érosion hydrique importante. Les mauvaises pratiques culturales entraînent la diminution de la teneur en matière organique et la dégradation de la structure des terres de barre.

Conscient de ce problème de dégradation des sols au Sud du Bénin, des activités de conservation des sols ont été entreprises dès les années 1964 avec installation des parcelles d'érosion (Azontondé, 1993). Ces activités de conservation de ces sols (les techniques antiérosives et de régénération du sol) ne se sont pas avérées efficaces. Cette réalité a amené les pédologues béninois à réorienter leurs recherches sur les terres de barre (Honlonkou, 1999). Après 13 années de recherches, il a été constaté que la fertilisation minérale n'a pas donné des résultats économiquement attractifs en milieu paysan sur les cultures vivrières (RAMR, 1992). Les CARDER ont introduit le Système Amélioré de Production pour une agriculture durable (SAP). Ce système combine les pratiques d'assolement/rotation, de gestion des résidus de récolte, de production et d'utilisation du fumier de ferme et les pratiques d'agroforesterie. La complexité de ce paquet technologique, l'absence de mesures d'accompagnement adéquats et l'environnement socio-économique et culturel ont largement contribué à la faible adoption de la

technologie (Saïdou, 2005). A partir des années 80, la recherche a orienté ses travaux dans deux directions : l'utilisation des ressources locales et notamment des phosphates naturels d'une part et la régénération du statut organique des sols d'autre part.

De cette époque date le démarrage des programmes de coopération internationale de la recherche agricole béninoise avec différents instituts (IFDC, IITA, KIT) ou universités (Louvain, Hohenheim). Un programme de cultures en couloir avec *Leucaena* et *Cajanus* a été initié mais sans succès en milieu paysan (Douthwaite *et al.*, 2002). Le *mucuna* a été vulgarisé au sud du Bénin en 1990. Les techniques de rotation à base de légumineuses à graines (niébé, arachide), de légumineuses de couverture (*Mucuna*) et de plantes fourragères (*Stylosanthes*) ont été testées. La jachère de courte durée de *Mucuna* (7 à 8 mois) en rotation ou en association avec la culture du maïs a permis de réduire très sensiblement les risques de ruissellement et d'érosion, d'accroître notablement les taux de matière organique et la teneur en azote des terres de barre (Azontondé, 1993). Des résultats spectaculaires de la lutte contre la dégradation des terres de barre ont été obtenus avec le *Mucuna* et autres plantes de couverture (Azontondé, 1993 ; Versteeg et Koudokpon, 1993 ; Houndékon et Gogan, 1996 ; Honlonkou, 1999 ; Totongnon *et al.*, 1999 ; Azontondé, 2000 ; Houngnandan, 2000 ; Adégbola *et al.*, 2002 ; Douthwaite *et al.*, 2002 et Amadji *et al.*, 2004). Ces techniques ont été très faiblement adoptées en milieu paysan à cause de nombreuses contraintes (la non consommation des graines de ces légumineuses de couverture et la gestion difficile de leurs résidus, etc.). Les résultats des essais d'utilisation de phosphate naturel ne peuvent pas être diffusés à cause de l'absence de source organisée d'approvisionnement (Douthwaite *et al.*, 2002). Les techniques culturales recommandant un travail minimum du sol n'ont pas fait l'objet de programmes de recherche. La pratique de non travail du sol et de semis direct sous couverture est peu connue au sud du Bénin. Par contre, les techniques culturales et les dispositifs de lutte anti-érosive ont été préconisés (Igué, 2013). Mais, les structures foncières au sud du Bénin ont freiné les initiatives et l'adoption de ces solutions. Avec la poussée démographique de la population à croissance géométrique, les terres cultivables ont été fortement réduites au profit de l'urbanisation, mettant en culture intensive les terres marginales telles que les bassins versants déjà naturellement exposés à toutes les formes de dégradation. Depuis près d'une décennie, avec cette série d'échecs de l'adoption des technologies de lutte contre la dégradation des terres de barre, les parcelles d'érosion ont été abandonnées et ont disparu. Il n'y a pas non plus de programme de recherche sur l'état et l'évolution de la dégradation de ces sols surtout marginaux au sud du Bénin. Cette situation très inquiétante constitue la motivation de la présente thèse qui étudie l'état de la dégradation du sol des bassins versants du sud Bénin sous l'effet des pratiques culturales intensives à travers des méthodes scientifiques conventionnelles et modernes. L'analyse de la motivation et de la bibliographie correspondante montre la nécessité de réactualiser les résultats sur l'état et l'évolution de la dégradation des terres de barre au sud du Bénin, en accordant une place importante aux connaissances locales. L'impact réel des pratiques culturales sur la dégradation des terres de barre en termes de bilan nécessite une prise en

compte des savoirs paysans et du facteur temps à l'échelle de plusieurs décennies que seule l'utilisation des retombées radionucléides permet de réaliser.

Ces travaux de recherche n'ont évidemment pas pour but de traiter l'ensemble des questions liées à la dégradation du sol. Ils ont permis de répondre à la question principale suivante : Les pratiques culturelles affectent-elles l'état ou l'évolution de la dégradation du sol des bassins versants au sud du Bénin ? Quatre questions secondaires se dégagent de cette question principale :

Q1 : Quelle perception les agriculteurs ont-ils du phénomène de la dégradation du sol et de ses causes?

Q2 : Quelles sont les pratiques culturelles des agriculteurs sur les bassins versants?

Q3 : Le sol des bassins versants étudiés est-il dégradé?

Q4 : Quelle est l'effet de quelques pratiques culturelles à la lutte contre la dégradation du sol?

Pour répondre à ces questions, cette étude vise à évaluer les effets des pratiques culturelles sur la dégradation des terres de barre au niveau de trois bassins versants au sud du Bénin. Cet objectif général se décline en quatre objectifs spécifiques qui sont :

- ❖ Analyser la perception des agriculteurs sur le niveau/l'état de la dégradation du sol au Sud-Bénin;
- ❖ Caractériser les pratiques culturelles des agriculteurs dans trois bassins versants au Sud-Bénin ;
- ❖ Evaluer l'état à l'aide de la technique de radionucléides dans les trois bassins versants en relation avec les pratiques culturelles des producteurs ;
- ❖ Evaluer l'effet des pratiques de conservation du sol sur la régénération des sols et la productivité du maïs dans les bassins versants.

Pour atteindre ces objectifs, des hypothèses de recherche ont été formulées :

- Analyse de la perception des agriculteurs sur le niveau/l'état de la dégradation du sol au Sud-Bénin
 - H1**: Les agriculteurs ont une bonne connaissance du phénomène de la dégradation du sol et de ses causes,
 - H2**: Les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs affectent significativement leur perception de la dégradation du sol.
- Caractérisation des pratiques culturelles des agriculteurs dans trois bassins versants au Sud-Bénin
 - H1**: Les pratiques culturelles des agriculteurs varient d'un bassin versant à un autre;
 - H2**: Les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs influencent significativement leurs pratiques culturelles.
- Evaluation de l'état de la dégradation du sol de trois bassins versants au Sud-Bénin
 - H1**: Le sol des bassins versants étudiés est dégradé;
 - H2**: L'état de la dégradation du sol varie d'un bassin versant à un autre.

- Evaluation de l'effet des pratiques de conservation du sol sur la régénération des sols et la productivité du maïs dans les bassins versants
 - H1:** Le travail du sol et le mulching réduisent significativement la dégradation du sol,
 - H2:** Le travail du sol et le mulching améliorent significativement la productivité du maïs.

2- DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette étude a été réalisée au sud du Bénin. En effet, le Bénin comporte 8 zones agro-écologiques regroupées en trois régions : le sud, le centre et le nord Bénin. Contrairement aux deux autres, la région du sud Bénin est caractérisée par une forte pression foncière et une baisse de la productivité des cultures (Evin, 2004). Sur les plateaux du Sud-Bénin, région de terres de barre à climat soudano-guinéen caractérisé par une pluviosité comprise entre 1 000 et 1 200 mm, la forte pression démographique (200 à 400 habitants au kilomètre carré) a réduit considérablement la durée des jachères et a entraîné la dégradation des sols (Azontondé, 1993). Trois villages ont été identifiées pour cette étude dans trois communes : le village de Govié, Arrondissement de Togoudo dans la Commune d'Allada ; le village de Lokogba, Arrondissement d'Aplahoué dans la Commune d'Aplahoué et le village de Linsinlin, Arrondissement de Dan dans la Commune de Djidja (Figure 1). Ces villages ont été choisis suivant les critères de type de sol (Terre de barre), du relief du sol (Versant) et de la présence d'une forêt ou d'une prairie non perturbée pendant près de 50 ans.

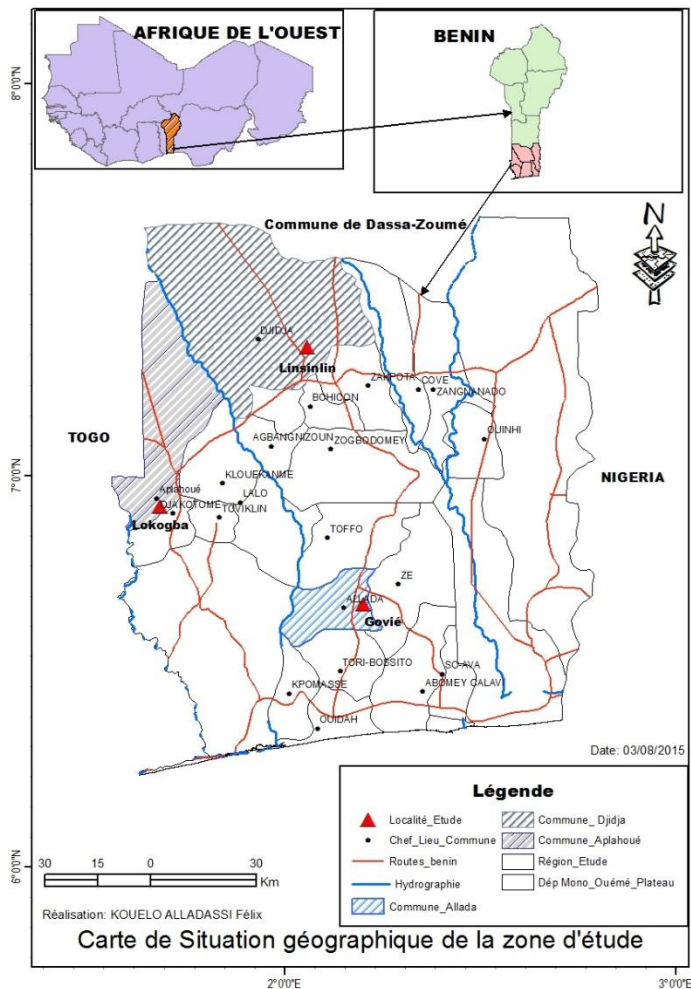
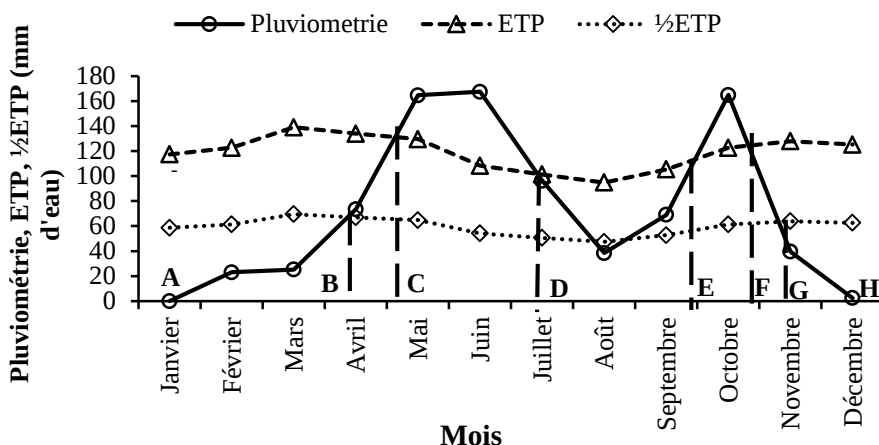


Figure 1: Carte de situation géographique de la zone d'étude

La Commune d'Allada est située entre 6°35' et 6°48' de latitude Nord et 2° et 2°18' de longitude Est. Dans le département de l'Atlantique, elle couvre une superficie de 381 Km² soit 0,34 % de la superficie total du Bénin. Allada comporte douze (12) arrondissements, au nombre desquels se situe l'arrondissement de Togoudo qui fait l'objet de la présente étude et comportant trois (03) villages à savoir Gavié, Togo et Zèbou. La Commune d'Allada est caractérisée par un climat de type subéquatorial encore appelé béninien. Les hauteurs moyennes annuelles des précipitations varient entre 1100 et 1200 mm, avec 82 à 122 jours de pluie par an. Le rythme pluviométrique est alors de type bimodal. Sur la Figure 2, les hauteurs de pluie et l'évapotranspiration potentielle (ETP) y sont représentées. Ce diagramme climatique permet d'identifier les mois de décembre, janvier, février et Mars comme les mois secs, les mois d'avril, d'août et de novembre

comme les mois préhumides et les mois de mai, juin, juillet et Septembre comme ceux humides. On note dans la Commune des températures élevées mais jamais excessives. Les moyennes des maxima observées sont de l'ordre de 32°C (Station de Cotonou). Les moyennes minimum descendent rarement en dessous de 25°C et se situent en décembre ou janvier, période où souffle l'harmattan. Le relief de la Commune est caractérisé par la présence de plusieurs dépressions situées sous le niveau de la mer près du lac Ahémé et par un plateau dans sa partie Nord-Est. Le dénivelé est d'environ 155 mètres entre ces deux zones. Les pentes des terres au niveau de la Commune sont généralement moins de 5 %.



AB et GH= Périodes sèches ; BC, DE et FG= Périodes pré humides ; CD et EF= Périodes humides

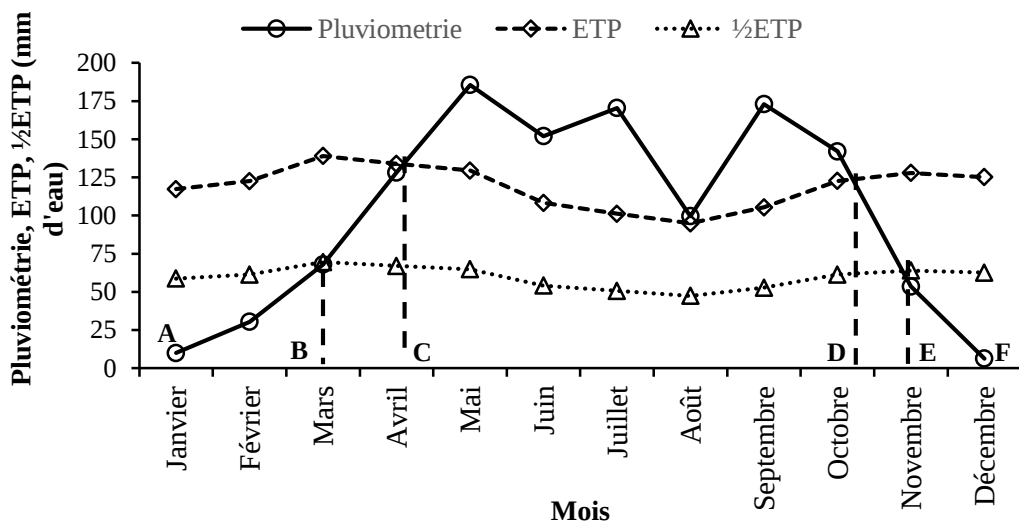
Source : Kouélo, 2015

Figure 2: Diagramme climatique de la commune d'Allada, période de 2004 à 2014

La végétation est dominée par les plantations d'*Eleasis guineensis* vieilles de plusieurs années, des palmeraies sub-spontanées et sélectionnées et des îlots forestiers reliques comme celui de Niaouli (forêt dense semi-décidue à faciès hygrophile) couvrant une superficie d'environ 220 ha avec au total 223 espèces végétales regroupées en 72 familles. Par endroit, sont rencontrés quelques îlots de formations forestières fortement dégradées. Cette forte dégradation traduit la très forte superficie qu'occupent la mosaïque de champs et de jachère, la mosaïque de culture et de jachère sous palmiers, les agglomérations et les plantations. Sur le plan pédologique, près de 90 % du territoire de la Commune d'Allada est constituée de sols ferrallitiques avec par endroits des sols latéritiques, argileux et hydromorphes. Évalué à 91778 habitants en 2002, l'effectif de la population d'Allada est estimé à 105 525 habitants en 2010 avec un taux d'accroissement de 1,76 % selon les données du RGPH3. Le secteur agricole occupe une place prépondérante dans l'économie de la Commune d'Allada en mobilisant environ 44% de la population totale active. Les

principales cultures produites dans la Commune d'Allada sont : le maïs, le niébé, l'arachide, le gombo, la tomate, le manioc, l'ananas, la patate douce, la tomate, le piment et le gombo. Parmi ces cultures, le maïs est la principale céréale et occupe en moyenne 73% des superficies emblavées annuellement (Nangbé, 2006).

D'une superficie de 915 km², la Commune d'Aplahoué est située entre 6°56'32'' de latitude Nord et 1°40'25'' de longitude Est. Elle compte sept (07) arrondissements dont Aplahoué qui est divisé en 13 villages et quartiers de ville. La Commune d'Aplahoué est caractérisée par un climat subéquatorial à quatre saisons. Les précipitations annuelles varient de 900 à 1100 mm/an. Ces caractéristiques du climat subissent des modifications par moment à cause de certaines perturbations. Les données pluviométriques de la région calculées sur une normale (1982 à 2012) donnent une moyenne de 1153,7 mm de pluie par an. L'amplitude thermique reste très variable au cours de l'année. Les maxima varient entre 29,1°C et 36,4°C et les minima, entre 22,3°C et 25,1°C. Que ce soit en considérant le principe de Gaussen (1949) (qui stipule qu'un mois est sec, si la hauteur des pluies enregistrées est inférieure au double de la moyenne thermique de ce mois) que le modèle de Franquin (1969) (pour lequel les mois secs sont ceux où la courbe de la moitié de l'ETP est au-dessus de celle des précipitations), sont considérés comme mois secs, les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars (Figure 3). Le bilan hydrique calculé sur la période de référence montre un déficit de 382,15 mm d'eau.



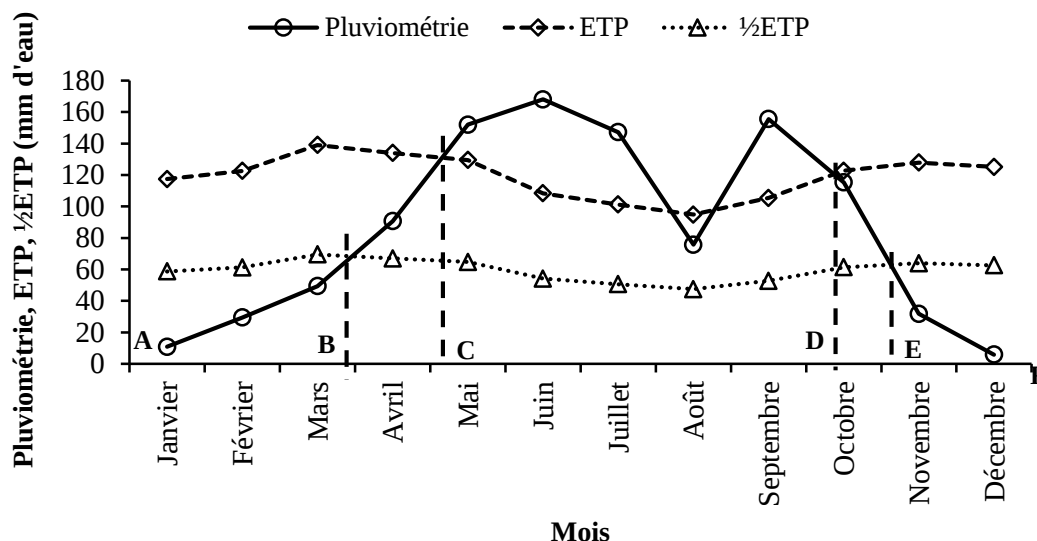
AB et EF= Périodes sèches ; BC et DE = Périodes pré humides ; CD = Période humide
 Source : Kouélo, 2015

Figure 3: Diagramme climatique de la commune d'Aplahoué, période de 2004 à 2014

La Commune est située sur le plateau Adja. C'est un plateau sédimentaire du continental terminal qui fait suite au plateau cristallin. Il est d'altitude moyenne de 80 m et légèrement incliné vers le sud où il se raccorde de manière sensible à la dépression médiane des "Tchi".

La Commune d'Aplahoué dispose d'une variété de sols. Les sols ferrallitiques faiblement lessivés (sur sédiment crétacé et sédiment du continental terminal) qui se rencontrent en grande partie dans tous les arrondissements. La Commune d'Aplahoué ne dispose que de 27 ha environ de forêt à Badjamè dans l'arrondissement de Lonkly, et de quelques îlots forestiers sous forme de forêts fétiches ou sacrées et forêts saxicoles mais de très petites dimensions. La Commune d'Aplahoué est plus ou moins bien arrosée. Les cours d'eau permanents rencontrés dans la commune sont : Doko, Tchitodou, Lomon, Kpako, fleuve Mono, Sinli, Gougan, Wontèmè, Kémadohoué et fleuve Couffo. Les cours d'eau saisonnières rencontrés sont : Bolou, Laogan, Kpéto, Houdjournè, Dotèmè, Sètouè, Agban et Kpoko. La population de la Commune d'Aplahoué fait 167.126 habitants en 2013 (PDC, 2010). Elle est une zone de très forte pression foncière (Biaou, 1991 ; INSAE, 2003) et concentre plus de 90% de sa population dans l'agriculture. La Commune d'Aplahoué est caractérisée par une agriculture paysanne, principalement vivrière. Les principales cultures sont le maïs, le manioc, l'arachide, le coton et le niébé (Honlonkou, 1994 cité par Houngho, 2008).

La Commune de Djidja est comprise 1°38' et 2°19' de longitude Est et 7°08' et 7°47' de latitude Nord. Elle couvre une superficie de 2315 km² et est subdivisée en soixante-dix-neuf (79) villages regroupés en douze (12) arrondissements. Linsinlin est l'un des neuf villages de l'arrondissement de Dan. La Commune de Djidja jouit d'un climat de type sub-équatorial tendant vers le soudano-guinéen dans les parties septentrionales. Aussi remarque-t-on que les deux maxima pluviométriques tendent vers un seul maximum avec un minimum supérieur à 80 mm (Figure 4). En général, les températures varient très peu au cours de l'année. Le maximum est de 24,6 °C en mars d'après les données de la station synoptique de Bohicon alors que le minimum est de 22,5 °C en août. Le relief est constitué de plateaux marqué par des affleurements granitiques (Lô) atteignant 100 m d'altitude. Deux substrata géologiques portent les sols de la commune. Il s'agit du continental terminal qui porte les sols ferrallitiques et du socle cristallin qui porte les sols ferrugineux. On observe des sols hydromorphes et des sols noirs par endroits (Fidespra, 2004). Plusieurs types de sols sont rencontrés à Djidja. On distingue : les sols ferrallitiques, ferrugineux tropicaux, les vertisols, les sols hydromorphes.



AB et EF= Périodes sèches ; BC et DE = Périodes pré humides ; CD = Période humide
Source : Kouélo, 2015

Figure 4: Diagramme climatique de la commune de Djidja, période de 2004 à 2014

Sur ces sols pousse une végétation qui souffre des actions destructrices des hommes. La végétation est constituée de palmeraies naturelles et de savanes arborées dans sa partie Sud-Est. Les galeries forestières bordant les cours d'eau ont connu les affres de l'activité humaine en quête du bois et de terres fertiles. Le couvert végétal naturel de la commune est fortement dégradé par la fabrication anarchique du charbon de bois. Néanmoins, des îlots de forêt donnant l'aspect d'une végétation arborée ou arbustive sont rencontrés par endroit. Deux forêts classées sont encore entretenues complétées par des plantations de teck à Dan et Setto. Ces forêts couvrent respectivement 1237 et 3150 hectares (Akomagni, 2006). S'agissant de l'hydrographie, la commune est drainée par 145 km de cours d'eau dont les deux (2) plus importants sont le Zou et le Couffo. La population de la Commune de Djidja est de 84.590 habitants selon les données du recensement de 2002, occupant ainsi la troisième place dans le rang des communes les plus peuplées du Zou. Selon les résultats du RGPH3 de 2002, 78 % de la population de Djidja est agricole (INSAE, 2004). L'agriculture est la principale activité menée dans la commune de Djidja, ce qui lui a valu la dénomination « Grenier du Zou ».

3- STRUCTURATION DE LA THESE

La présentation de ce document est organisée en cinq chapitres en dehors de la conclusion générale et des perspectives. Les chapitres sont organisés en sous chapitres. Les sous chapitres correspondent à des articles publiés et soumis, ou des pré-articles à

soumettre sauf le premier chapitre qui présente l'état de l'art sur la démarche méthodologique.

- Le premier chapitre est consacré à l'introduction générale et présente la problématique, la zone d'étude, les objectifs, les questions et hypothèses de recherche.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude bibliographique qui détaille l'état des connaissances sur le sujet de la thèse après avoir opérationnalisé les concepts du thème d'étude.
- Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des savoirs locaux des agriculteurs et des facteurs qui influencent leur perception. Les pratiques culturelles adoptées par les agriculteurs ont été caractérisées et les facteurs qui déterminent l'adoption de ces pratiques ont été étudiés.
- Le quatrième chapitre traite de l'état de la dégradation du sol des bassins versants étudiés par des mesures physiques (sous chapitre 1) et par les techniques basées sur l'utilisation des retombées radionucléides (sous chapitre 2).
- Le cinquième chapitre présente les résultats de l'étude de l'effet de quelques pratiques culturelles des agriculteurs sur la dégradation du sol. Dans le premier sous chapitre, l'effet de ces pratiques sur l'érosion hydrique a été étudié et dans le second, leur effet sur la productivité du maïs a été évalué.
- Le sixième chapitre est consacré à la discussion générale des résultats.
- La conclusion générale fait le point des principaux apports de l'étude à la science et propose des perspectives de recherche et de développement, à court, moyen et long terme.

*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*

Platon

CHAPITRE I

ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PRATIQUES CULTURALES ET LA DEGRADATION DES SOLS

1-1- OPERATIONNALISATION DES CONCEPTS

Il est nécessaire de définir certains concepts et terminologies utilisés dans ce document pour exprimer au mieux notre pensée ou se conformer au langage théorique approprié dans le domaine abordé.

1-1-1- Terre de barre

Le terme « terre de barre » provenait des mots portugais « barral » qui signifie argile (Raunet, 1973), « barro » argile sableuse (Azontondé, 1993) ou de l'expression portugaise « terra de barro » qui signifie terre argileuse (Igué, 1990). Regroupant la famille des sols formés sur le Continental Terminal, les terres de barre font partie de la classe des sols ferralitiques faiblement désaturés (Willaine, 1962). Selon Ségalen (1995), les terres de barre résultent des eaux de pluies chaudes, abondantes et diluées qui arrivent sur un matériau primitif dans un milieu à drainage élevé, entraînant l'altération complète des minéraux primaires, avec conservation de minéraux peu altérables, comme le quartz, la synthèse de minéraux secondaires (kaolinite, sesquioxides de fer, hydroxyde de fer et d'aluminium, divers oxydes de titane, de manganèse). Ces sols sont alors essentiellement un mélange de matière organique, de kaolin, de squelette quaternaire et d'oxydes hydratés (Agossou, 1983).

1-1-2- Dégradation du sol

L'utilisation du sol peut être définie comme une jouissance temporelle et spatiale des fonctions du sol. Les sols accomplissent un certain nombre de fonctions qui sont : fonction biologique (habitat biologique et réservoir de gènes), fonction alimentaire (production de biomasse) et fonction d'échange et de filtre (régulation et protection de l'environnement) (Tavernier et Lizeaux, 1993 ; Floret et Pontanier, 2001).

La dégradation du sol résulte de l'utilisation abusive d'une fonction du sol au détriment des autres (Floret et Pontanier, 2001). La dégradation du sol est la perte des fonctions de ce sol (SMDD, 2002). Un sol dégradé est un sol qui est passé à travers un ou plusieurs seuils d'irréversibilité (William et *al.*, 1993), c'est-à-dire que les perturbations externes subies par le sol l'ont conduit à un état au-delà duquel le retour à l'état de départ n'est plus possible dans un intervalle de temps convenable (perte de résilience du sol). A ce stade, le sol ne peut plus assurer une ou plusieurs de ses fonctions. La notion de dégradation peut être aussi définie comme une baisse de la qualité du sol. La qualité d'un sol décrit son efficacité à maintenir et à libérer des éléments minéraux et d'autres constituants chimiques, maintenir l'eau dans les nappes et rivières mais aussi la

libérer pour les besoins des plantes, promouvoir et assurer la croissance racinaire, maintenir un habitat et répondre vite et bien à l'intervention humaine tout en résistant à la dégradation (Mando *et al.*, 2001). Un sol dégradé est donc un sol qui a perdu une ou plusieurs de ses qualités. La perte de qualité est liée à la résilience du sol, aux formes de gestion de ce sol (durable ou non) et aux conditions environnementales.

D'un point de vue agricole, la dégradation se traduit par la perte de la productivité actuelle et potentielle du sol. Cela implique une baisse inhérente des capacités du sol à produire des biens économiques ou à assurer ses fonctions de régulations environnementales (Roose, 1994). Comprendre les types de dégradation du sol induits par l'homme, aussi bien que leurs causes, y compris les facteurs socioéconomiques, est une condition indispensable pour développer des technologies de réduction des effets de ces dégradations. En général, les trois principales catégories de dégradation des terres selon la FAO (2003) sont :

- La dégradation physique, avec l'érosion hydrique et l'érosion éolienne, l'encroûtement et la battance, la compaction, l'engorgement et la réduction de l'infiltration.
- La dégradation chimique, avec l'acidification, l'épuisement du sol par la lixiviation des éléments nutritifs, la pollution par les déchets industriels et l'application excessive ou irrationnelle des pesticides ou des engrais.
- La dégradation biologique, avec la forte réduction de la teneur en matière organique du sol, la combustion de la biomasse et l'épuisement de la couverture de végétation et de la faune du sol.

Les processus de dégradation les plus importants en Afrique sont d'une part l'érosion du sol (83,8% des terres dégradées dont 45,95% pour l'érosion hydrique et 37,85% pour l'érosion éolienne) et d'autre part la baisse de la fertilité des sols (épuisement des éléments nutritifs et diminution du taux de matière organique) pour 12,55% des terres dégradées (FAO, 2003). Ces formes de dégradation du sol sont grandement responsables de l'insécurité alimentaire dans la sous-région.

1-1-3- Pratiques culturelles

Les pratiques culturelles ou agricoles constituent un ensemble de règles à respecter dans l'implantation et la conduite des cultures de façon à optimiser la production agricole, tout en réduisant le plus possible les risques liés à ces pratiques, vis-à-vis de l'homme et de l'environnement (<http://www.uarga.org/developp-durable/phytosanitaires.php>). Les pratiques agricoles comprennent les actions qui contribuent à une bonne production agricole tout en préservant le capital sol. Il s'agit de l'utilisation de semences de qualité, du respect des itinéraires techniques et d'une bonne protection des cultures. Du point de vue économique, les pratiques agricoles doivent garantir une valeur ajoutée à l'activité agricole en contribuant à l'amélioration du rendement et une réduction des coûts globaux de production. Du point de vue social, les pratiques agricoles par leur contribution à l'amélioration des revenus permettent aux producteurs d'améliorer leurs conditions de vie

en favorisant l'épanouissement social. Du point de vue environnemental, le sol et la nature constituent un cadre de promotion de l'agriculteur. Il est donc important de maintenir la capacité productive du sol et de conserver la biodiversité qui joue un rôle également social dans la vie des producteurs (FAO-INERA, 2004). Ces pratiques, telles que définies, sont de bonnes pratiques agricoles (BPA). Les pratiques agricoles peuvent avoir des effets nuisibles et indésirables, à éviter ou à compenser, sur les éléments de l'environnement. Elles peuvent aussi avoir un effet souhaitable à court terme ou localement, mais à long terme et à grande échelle, l'effet est nuisible sur les éléments de l'environnement (Nguekam, 2010). Ainsi, elles deviennent de mauvaises pratiques agricoles. Les principales causes de la dégradation des sols sont des pratiques agricoles inadéquates, mieux, des mauvaises pratiques agricoles. La première des actions pour freiner la dégradation des terres est de limiter les mauvaises pratiques agricoles surtout celles qui épuisent les sols.

1-1-4- Bassin versant

Un bassin versant est un territoire recevant les eaux des précipitations qui alimentent les cours d'eau ou une portion de territoire naturellement délimitée par des lignes de crête, dont les eaux alimentent un exutoire commun c'est-à-dire le cours d'eau et le lac. C'est aussi l'aire de collecte des eaux de pluies qui ruissellent et se concentrent en un point déterminé d'un cours d'eau (Berton, 1988 ; Tovidé, 2013). Jasmin, cité par Agoïnon (2006) définit le bassin versant comme l'ensemble du paysage qui concourt au fonctionnement hydrologique d'un réseau de bas-fonds depuis la ligne de crête jusqu'au talweg en incluant les versants. Le bassin versant est donc l'ensemble d'une zone ou d'une région drainée par un cours d'eau et/ou par l'un au moins de ses affluents. Dans nos activités de recherche, le bassin versant n'a pas fait l'objet d'étude de caractérisation. Les agriculteurs de ces bassins ont été enquêtés et ont participé au choix des transects d'étude sur un versant quelconque du bassin choisi selon la facilité de son accès et l'occupation de son sol.

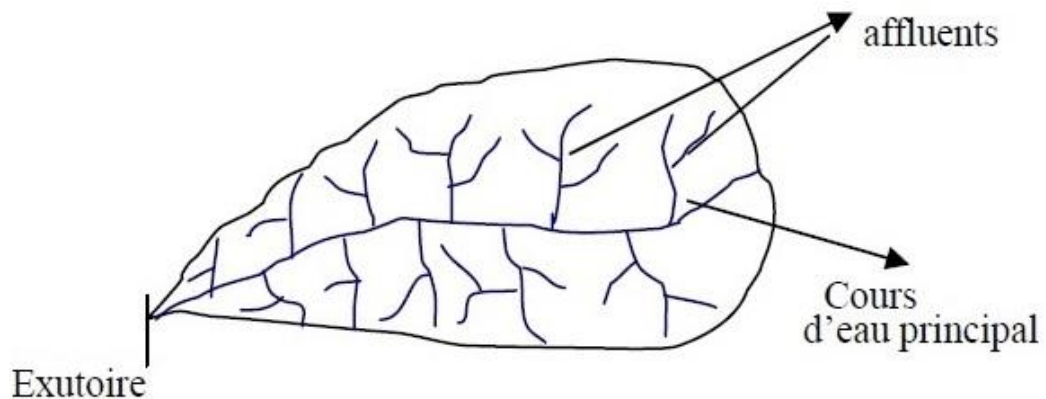


Figure 5 : Schéma d'un bassin versant

1-2- PRATIQUES CULTURALES ET DEGRADATION DU SOL

1-2-1- Usage des engrais minéraux

Les effets liés à la dégradation de la fertilité des terres de barre sont essentiellement la baisse des rendements des cultures. En effet, la culture intensive sur les terres de barre a entraîné selon Igué (1990) et Azontondé (1993), une diminution de sa réserve nutritive et un appauvrissement en bases échangeables ; une apparition de carences en potassium, phosphore et en soufre ; un mauvais fonctionnement de la transformation de l'azote dans le sol ; une apparition d'aluminium échangeable. La baisse de fertilité des sols constitue une des principales difficultés que connait actuellement l'agriculture béninoise. En effet, les terres cultivées s'épuisent à un rythme accéléré et les rendements des cultures baissent continuellement ; ce qui compromet dangereusement la productivité et la durabilité de tout le système agricole (Ton et Haan, 1995). Ceci a pour conséquence la diminution des revenus des producteurs, l'endettement des producteurs, la cherté des produits agricoles et l'insécurité alimentaire (Montcho, 2015). Certaines activités agricoles contribuent à ces effets nocifs, mais il ne faut pas perdre de vue que l'industrialisation, l'urbanisation, la construction de routes, les incendies, les diverses activités humaines et de façon plus générale, la pression démographique et les changements climatiques, jouent également un rôle prépondérant. Les pratiques agricoles responsables de la baisse de la fertilité des sols sont la sur-utilisation ou la sous-utilisation des engrais minéraux et organiques; l'utilisation de pesticides ayant des effets secondaires indésirables sur la vie des organismes des sols en particulier la biodiversité et la matière organique du sol (Montanarella, 1999). Les effets de la pollution environnementale due à l'utilisation excessive d'engrais sont notamment sous forme d'acidification des sols, l'eutrophisation des eaux des lacs, la contamination des eaux de surface et des nappes phréatiques, et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre fortement toxiques (FAO, 2003). Dans de nombreuses régions de l'Afrique subsaharienne comme au Bénin, la sous-utilisation des engrais entraîne, du fait du prélèvement non compensée des nutriments par les cultures, l'épuisement des sols avec comme conséquence la dégradation des sols et la baisse des rendements. Les agriculteurs ne respectent pas les modes d'utilisation des intrants agricoles au Bénin (engrais et pesticides). Les modes d'application des engrais varient d'un agriculteur à un autre (Wennink et *al.*, 2000). Pour cause, les agriculteurs sont souvent confrontés à un problème de manque de ressources financières pour l'acquisition des engrais (Alohou et Wennink, 2001). Ainsi, les doses appliquées varient suivant la capacité financière des producteurs (sous-dosage ou surdosage). Ces engrais ne sont pas souvent disponibles dans les régions béninoises (Adégbidi et *al.*, 2000 ; Adégbola et *al.*, 2002).

Le bilan au niveau de la fertilité des terres de barre, est faible et continue de se dégrader. En effet, différentes études ont été menées sur l'effet des engrais minéraux sur ces terres. Ces engrais, en enrichissant le sol en substances nutritives, n'améliorent pas sa structure. Car les engrais minéraux fournissent de façon immédiate les éléments nutritifs

nécessaires au développement de la plante mais ne contribuent guère à l'amélioration ni au maintien de leur structure (Aho et Kossou, 1997). Des expérimentations à long terme en Afrique de l'Ouest ont amené Bationo et Mokwunye (1991) à constater que l'utilisation des engrais minéraux sans recyclage des résidus de récolte augmentait les rendements mais pas de façon durable. Selon Pieri (1989), l'apport d'engrais minéral uniquement, quelles qu'en soient les doses induites en dix ans une baisse de 30 à 50% de rendement. C'est le cas des résultats obtenus à Saria de 1971 à 1978 où les rendements en maïs sont passés de 664 kg/ha à 450 kg/ha par l'apport de peu d'engrais et de 1079 kg/ha à 500 kg/ha en fumure forte (Aholoukpè, 2002). Ainsi, le "tout engrais" n'est pas la solution face à l'épuisement des terres et à la dégradation des terres en zone tropicale. Pour restaurer la fertilité d'un sol épuisé ou dégradé, il faut non pas un engrais minéral qui risque d'intensifier sa dégradation mais un amendement organique dont l'intérêt est de reconstituer le stock de la matière organique du sol, réduire les effets acidifiants des engrais minéraux et améliorer l'efficacité de ces derniers (Azontondé, 1998).

1-2-2- Usage des engrais organiques et plantes améliorantes.

La fumure organique permet d'assurer la conservation de la structure et du potentiel de production du sol. Elle consiste à renouveler ou à reconstituer le stock de la matière organique du sol. Pour les sols contenant de l'argile de type kaolinite comme les terres de barre, les propriétés chimiques et biologiques, dépendent largement du taux de la matière organique. En effet, la Capacité d'Echange Cationique (CEC) dans les terres de barre, en moyenne entre 5 et 9 méq/100g de sol en surface d'une part, et entre 4 et 7 méq/100g de sol en profondeur d'autre part, est relativement faible (Fauck, 1962). En surface, elle a un rapport net avec le taux de matière organique. En profondeur, malgré des taux d'argile atteignant parfois 60%, la CEC reste faible. Cette argile de type kaolinite, a un faible pouvoir fixateur qui varie en général de 3 à 15 méq/100 g de sol (Segalen, 1995 ; Aho et Kossou, 1997). Cette faible capacité d'échange cationique qui varie de 3 à 5 méq/100g de sol selon Igué (1990) est due à la faible CEC (5 à 10 cmol/kg) de la kaolinite (Azontondé, 2000). Azontondé (1993) expliquait la diminution de la capacité d'échange cationique des terres de barre par la culture intensive sans restitution organique pratiquée sur les sols. Agbo (1999) constate également que sur la terre de barre de Houèto dans la commune de l'Atlantique au Bénin, sous l'effet d'une culture permanente, que la CEC est passée de 4,1 à 3,1 cmol/kg de sol.

Plusieurs études ont mis en évidence, pour la zone subsaharienne, l'extraordinaire rapidité de dégradation des sols imputable à la diminution du stock de matière organique et à l'apparition de carences en azote, phosphore et divers éléments à la suite de la mise en culture des terres (Feller et *al.*, 1982). Balasubramanian et *al.* (1984), I.R.C.T. (1986) et Ouattara et *al.* (1997), obtiennent une corrélation positive entre matières organiques du sol et caractéristiques chimiques considérées comme favorables : teneur en azote (la matière organique représente la quasi-totalité des réserves d'azote et de soufre du sol),

capacité d'échange cationique, calcium échangeable, résistance à l'acidification et à l'apparition d'aluminium et fer assimilables toxiques.

Au Bénin, les études se sont plutôt appesanties sur la contribution des engrais organiques dans la nutrition des plantes et à l'amélioration de la fertilité du sol (Amadji et Migan, 2001 ; Amadji *et al.*, 2009 ; Houndantodé *et al.*, 2011 ; Saïdou *et al.*, 2012). Malgré ces effets positifs, on ne saurait faire l'amalgame entre fertilité et teneur en matières organiques du sol. L'accroissement « anormal » de la matière organique du sol peut être un signe de déséquilibre ou de dysfonctionnement de l'écosystème (matières organiques peu bio-dégradables, sol très argileux, acide, trop sec ou engorgé) et peut donc aller dans le sens d'une mobilisation lente des nutriments, inefficace à toute production ; mais une minéralisation trop active va aussi dans le sens des pertes en sels minéraux assimilables et de l'acidification (Floret et Pontanier, 2001). Un autre problème reste l'approvisionnement des engrais organiques dans une zone (Sud du Bénin) où l'élevage de gros ruminant est très peu développé. Cette pratique n'est donc possible qu'à petite échelle dans une zone où l'association de l'élevage à l'agriculture est très faible voire inexistante. Une alternative pour gérer l'amélioration de la fertilité des terres de barre dégradées est l'agroforesterie et plus précisément les cultures en couloirs. Sinsin (1994) préconisa alors l'agroforesterie comme une approche scientifique de maintien ou d'amélioration de la fertilité des sols sous les tropiques. Il montra que les cultures installées entre des haies d'arbustes généralement les légumineuses fourragères (*Leucaena leucocephala* et *Gliricida sepium*) améliorent le potentiel de production des sols par la production de matière organique, le recyclage des éléments biogènes, etc. Cependant, ce système de culture entraîne une compétition entre haies et cultures, et le coût en travail de gestion est décourageant. Le système ne peut fonctionner durablement qu'avec une fumure minérale additionnelle car la haie et les émondes immobilisent trop les éléments assimilables du sol (Kallon *et al.*, 1998). La compétition pour les éléments nutritifs et la lumière, la perte de rendement sur les cultures, le coût élevé de l'investissement pour l'implantation et l'augmentation du temps de travail constituent donc des inconvénients du système agroforestier (Boisset, 2005). L'échec des pratiques agroforestières résiderait dans le fait que les essences à croissance rapide introduites (*Leucaena leucocephala*, *Calliandra calothyrsa*, *Gliricida sepium*, *Sesbania grandiflora*, *Acioa barteri*, *Flemingia congesta*, *Senna siamea*,) par l'IITA ne présentent pas des intérêts économiques immédiats pour les producteurs (Saidou, 2005). Les contraintes foncières telles que les difficultés d'accès à la terre et la petite taille des exploitations déterminent le faible taux d'adoption de ce système agroforestier (Maliki *et al.*, 2000). Par conséquent, les systèmes de jachères améliorées de courte durée avec les légumineuses de couverture (*Mucuna pruriens*, *Stylosanthes sp.*, *Pueraria*, *Aeschynomene*, etc.), en rotation, en cultures dérobées ou en association sont plus efficaces. Plusieurs travaux de recherche ont montré les effets positifs des légumineuses de couverture sur la productivité des cultures et la restauration de la fertilité des terres de barre (Azontondé, 2000 ; Houngnandan, 2000 ; Douthwaite *et al.*, 2002 et Amadji *et al.*,

2004). Cette pratique agricole n'a pas été adoptée par les agriculteurs à cause de la non consommation des graines de ces légumineuses, le manque de bénéfice immédiat, la difficulté d'enfouissement des résidus lors du billonnage et la présence de reptiles favorisée par leur importante biomasse aérienne sans oublier le non accompagnement des agriculteurs après leur vulgarisation. Il faudra alors dans le cadre de la restauration de la fertilité des terres de barre, revoir les pratiques agricoles des producteurs mais avec leur participation effective dans les processus de génération des technologies. L'accent doit être mis sur les pratiques locales basées sur l'utilisation des ressources localement disponibles.

1-2-3- Usage des pesticides

L'emploi des pesticides est entré dans les habitudes des agriculteurs au Bénin et a été favorisé par la culture cotonnière. Les pesticides contrôlent les ravageurs et vecteurs de maladies des cultures ainsi que les adventices. Mais, ils éliminent aussi leurs ennemis naturels (FAO, 2011). Les pesticides permettent d'accroître les rendements agricoles, mais leur usage, même avec précaution peut présenter des risques importants pour l'homme et la nature (Ramade, 1992). Les pratiques sont le plus souvent l'utilisation de pesticides dont la nature, la qualité et les doses apportées ne respectent pas toujours les recommandations pour une utilisation écologiquement rationnelle. Des études ont montré que l'utilisation des pesticides stimule l'activité respiratoire et la biomasse microbienne du sol juste après le traitement mais les réduit plus tard (Sedogo, 1993 ; Behki et Khan, 2001; Lompo, 2007; Traoré et *al.*, 2007). Cette perturbation de la vie édaphique est un risque important pour une productivité durable du sol dans la mesure où l'activité biologique est un indicateur de la « bonne santé » d'un sol. Une utilisation abusive et non maîtrisée des pesticides peut donc être un risque pour la dégradation de la fertilité du sol même si les doses apportées n'ont pas un effet d'élimination totale des groupes spécifiques de microorganismes tels que les bactéries ammonifiantes. Ces doses perturbent la vie du sol en affectant l'efficacité des microorganismes dans la décomposition de la matière organique, en activant tantôt la respiration et la biomasse microbienne et tantôt en les inhibant (Ouattara et *al.*, 2010).

1-3- PRATIQUES CULTURALES ET EROSION HYDRIQUE DU SOL

L'érosion hydrique peut être définie comme le détachement et le transport des particules sous l'effet de la pluie, lorsque le sol n'est plus capable de laisser infiltrer l'eau. Cette situation se produit généralement sur des sols préalablement fragilisés, dans le cas d'une intensité de pluie supérieure aux capacités d'infiltration du sol (lors d'orages violents notamment), ou sur des sols gorgés d'eau (Dupilet, 2003). Selon la FAO (1994), l'érosion vient du verbe latin "ERODERE" qui signifie "ronger". Elle représente l'ensemble des phénomènes qui contribuent, sous l'action d'un agent d'érosion (notamment l'eau) à modifier les formes de relief que sont les sommets de plateau, les rebords de

plateau, les talus, les corniches, les terrasses, les versants. Elle peut être causée par l'eau (érosion hydrique) ou par le vent (érosion éolienne). L'érosion hydrique est la plus importante forme d'érosion observée au Bénin et surtout au Sud du Bénin. En relation avec les précipitations et le ruissellement, l'érosion hydrique des sols se définit au sens strict comme l'arrachement et l'entraînement de particules de sol. Il s'agit donc d'une modification de la structure du sol dans le sens d'une désagrégation. Le concept « érosion » inclut donc les notions d'arrachement des particules, de transport et de dépôt ultérieur (Dautrebande et Sohier, 2006 ; Figure 6).

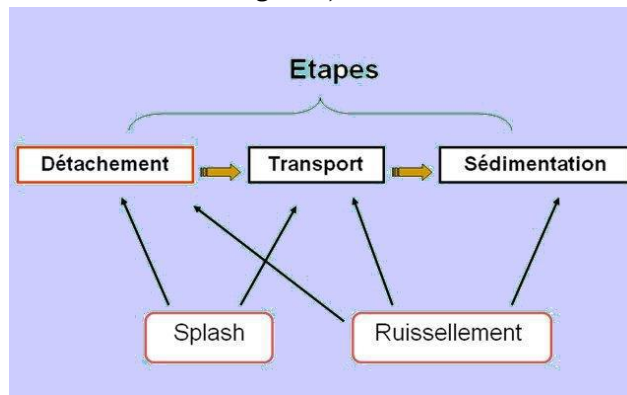


Figure 6: Les étapes du processus de l'érosion (Dautrebande et Sohier, 2006)

1-3-1- Manifestations de l'érosion hydrique

L'érosion des sols se fait sentir généralement, lorsque les eaux de pluie ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol, soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée d'eau (Le Bissonnais et *al.*, 2002).

1-3-1-1- Détachement des particules

Le détachement des particules se produit à la surface du sol lorsque, sous l'action des gouttes de pluie, des agrégats éclatent et les particules rejailissent ou lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol (Georges, 2008).

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont :

➤ L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies : Les quatre processus qui peuvent être identifiés comme responsables de la désagrégation sont :

- L'éclatement, correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité.
- Le gonflement différentiel. Ce phénomène intervient suite à l'humectation et à la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats.

L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols.

- La dispersion physico-chimique. Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et de la valence des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol.
- La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie (= Détachement par spash). L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes cités précédemment et nécessite une pluie d'une certaine énergie qui est variable selon les sols. L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash (Figure 7).

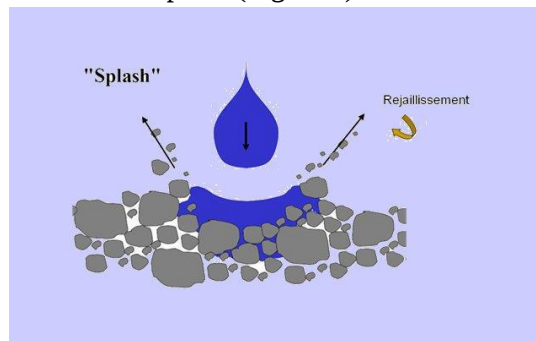


Figure 7 : Le phénomène du détachement et du splash (Leguedois et *al.*, 2005)

Une fois détachées, la distance moyenne de projection des particules peut atteindre de 10 à 20 cm (Leguedois et *al.*, 2005), c'est-à-dire beaucoup plus que l'observation visuelle du phénomène ne le laisse supposer (Figure 8).



Figure 8: Le phénomène du détachement et du splash en milieu réel

L'énergie cinétique est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse :

$E_c = \frac{1}{2} mv^2$ avec m : la masse de la goutte ; v : la vitesse de la goutte et E_c : l'énergie cinétique en joule (si m en kg et v en m/s). Le diamètre des gouttes de pluie, leur vitesse de chute et leur masse totale déterminent la capacité de détachement des particules du sol (Melalih, 2012). La taille et l'impact des gouttes sont des facteurs importants dans ce processus de destruction et d'arrachement (éclaboussement par effet splash). L'énergie cinétique des gouttes qui tombent est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides. En Afrique, par exemple, elle peut être deux à six fois plus importante que dans les zones tempérées (FAO, 1994a). Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration (battance). Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement (Roose, 1973).

➤ Le ruissellement est l'écoulement par gravité à la surface du sol suivant la pente de terrain. Au début, il y a saturation progressive du terrain, et le ruissellement se déclenche si le taux de précipitation dépasse la capacité d'infiltration du sol. Le ruissellement est exprimé normalement en volume (m^3) ou en hauteur (mm) par rapport à une superficie tandis que l'écoulement s'exprime par unité de temps ($m^3 s^{-1}$). On distingue deux types de ruissellement (Ambroise, 1999) : le ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration appelé ruissellement hortonien et le ruissellement par sol saturé. Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace. Le ruissellement qui peut être diffus ou concentré est fonction des cinq paramètres suivants : l'intensité relative de la pluie ; l'indice de rugosité faible ; la pente ; la durée de la pluie ; l'infiltration dans le sol (Morsli et al., 2004).

1-3-1-2- Transport des particules

Le vecteur de transport est ici le ruissellement superficiel. Il est généré soit par saturation de la porosité du sol (mécanisme de Dunne), soit par refus à l'infiltration dû à une pluie dont l'intensité est supérieure à la capacité d'infiltration de la surface du sol (mécanisme de Horton) (Leguedois, 2003). Il est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement = effet splash) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées. Ce phénomène est donc dépendant du type de pluie et de sol. Plusieurs auteurs ont signalé que la génération du ruissellement est influencée par l'état de surface du sol (Auzet et al., 1995 ; Le Bissonnais et al., 2005). D'autres auteurs ont montré que les variations de ruissellement et d'érosion

dépendent des changements du couvert végétal et de la gestion des utilisations de la terre (Kosmas et *al.* 1997, Saber, 2002 ; Saber et Mrabet, 2002). Les propriétés de l'écoulement, volume ruisselé, hydraulique et distribution spatiale, sont aussi fortement dépendantes de la rugosité de la surface (Govers et *al.*, 2000). Dès que les particules sont érodées du sol ou arrachées au lit de l'oued et transportées dans les cours d'eau, on parle de transport solide. Deux grands modes de transport des particules peuvent être distingués (Figure 9) : le transport de fond et le transport en suspension (Yalin, 1980 ; Cheggour, 2008).

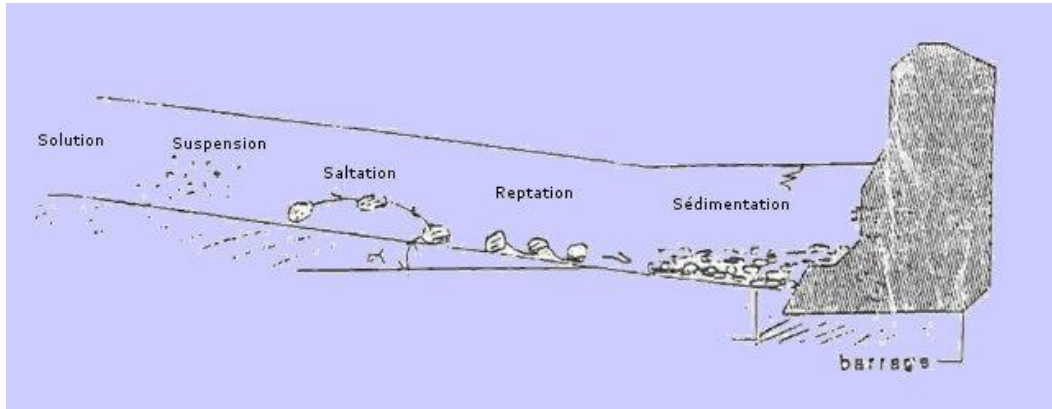


Figure 9: Modes de transport par ruissellement (Yalin, 1980)

1-3-1-3- Sédimentation

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Il s'effectue lorsque l'énergie cinétique qui déplace les matériaux issus du détachement, diminue ou s'annule (Démangeot, 2000). Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction de leur dimension, de leur densité et de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau. Les particules se déposent dans l'ordre suivant : sable - sable fin - limon. Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation. Ainsi, le diagramme de Hjulström ((Figure 10) permet de relier la vitesse de sédimentation du courant avec le diamètre des particules.

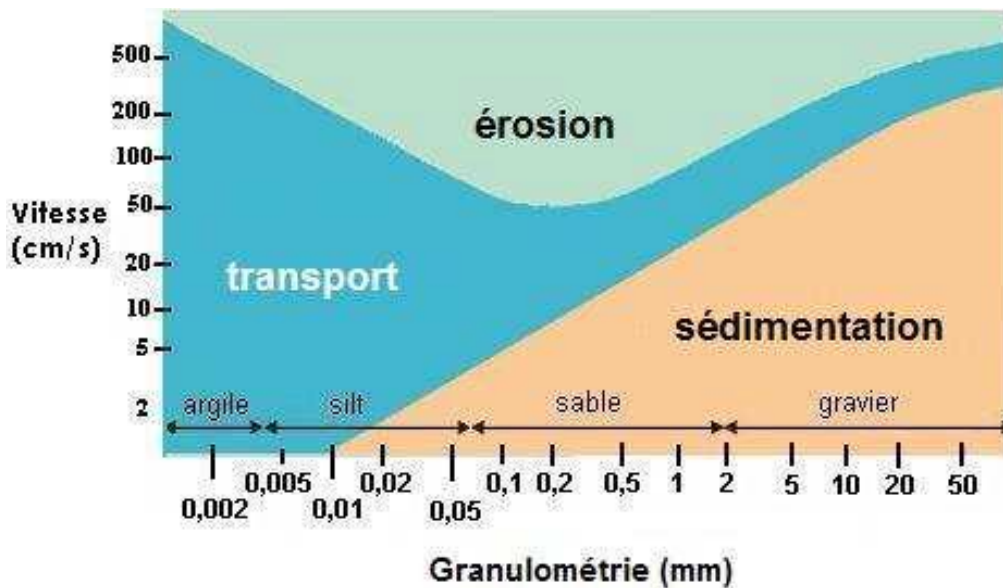


Figure 10: Diagramme de Hjulström

1-3-2- Différentes formes d'érosion hydrique

Il existe plusieurs types d'érosion hydrique du sol. Selon les regroupements de ces types d'érosion, il y a deux ou trois formes d'érosion. Selon Wischmeier et Smith (1978), Bollinne (1982), PNUE (1998) et Dautrebande et Sohier (2006), il y a deux formes d'érosion : l'érosion diffuse et l'érosion en ravines. Pour l'érosion diffuse, le ruissellement sur les terres peut prendre une forme « diffuse » quasi invisible à l'œil nu (la terre a l'air de « suinter »), ou se concentrer en rigoles soit naturelles soit formées par des traces de roues ou autre. L'érosion diffuse regroupe l'érosion en nappe (sheet erosion) et l'érosion en rigoles (rill erosion). L'érosion en ravines (gully erosion) est une érosion dite concentrée, de type volumique : les ravines sont de largeur et de profondeur variables (parfois plusieurs mètres) et leur apparition gêne les travaux culturaux sur les terres agricoles. On distingue deux types de ravines : les ravines temporaires résultant essentiellement des effets du ruissellement temporaire de surface plus ou moins concentré ; les ravines de talus (bank gullies) qui procèdent plus des effets d'eaux de ruissellement se concentrant et/ou s'infiltrant localement au droit de ruptures significatives de pente et entraînant des mouvements et transports de masse (effondrement et glissements de terrain) ou des processus souterrains d'érosion en galerie (effondrement brusque).

Selon d'autres auteurs (FAO, 2003 et Cheggour, 2008), il existe trois formes d'érosion : l'érosion en nappe, l'érosion linéaire et l'érosion en masse. L'érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. De ce fait elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'

une érosion importante de 15 à 30 t.ha⁻¹.an⁻¹ correspond à une perte annuelle de hauteur de 1 à 2 mm. L'érosion linéaire est un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses: non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et même des blocs. Lorsque le ruissellement est ainsi concentré, la vitesse augmente, l'érosion n'est plus sélective et creuse des rigoles et des ravines (Roose, 1994). L'érosion linéaire provoque donc un décapage total de l'horizon humifère et de l'ensemble des matériaux meubles sur la largeur concernée par les chemins de l'eau. Elle est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). On parle de griffes, lorsque les petits canaux ont quelques centimètres de profondeur, de rigoles, lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur et de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de cm (plus de 50 cm) (Roose, 1994). L'érosion par ravinement est la forme culminante de l'érosion du sol. Les dégâts causés sont d'autant plus importants que la stabilisation et la réparation de cette forme d'érosion sont les plus coûteuses de tous les travaux de lutte contre l'érosion. Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain. Dans ce cas, seul l'Etat dispose des moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse.

1-3-3- Influence des pratiques culturelles sur l'érosion du sol

L'érosion hydrique qui s'exerce de manière spectaculaire est due à l'action de plusieurs facteurs dont les plus importants sont le climat, la nature du sol, la végétation et les facteurs anthropiques.

Le climat prend un caractère agressif et provoque une dégradation rapide des horizons superficiels et de forts ruissellements lorsque le sol est dépourvu de végétation.

La notion de pente comprend en réalité deux facteurs bien distincts : le degré d'inclinaison du terrain par rapport à l'horizontal et la longueur sur laquelle s'applique ou se manifeste de façon continue un processus. L'influence de la pente (inclinaison, longueur, forme) est très complexe. La perte de la couverture végétale entraîne une exposition de sol à l'érosion éolienne et hydrique, et la perte des sols fait diminuer le potentiel de production agricole, ceci entraîne au final une diminution de la charge animale des parcours (Melalih, 2012).

L'homme est l'une des causes principales de l'érosion, il est responsable des destructions des forêts, du défrichement, des incendies, des surpâturages et des techniques culturales mal suivies. Ce sont les agents de la dénudation artificielle du sol, car dans le

monde entier 5.000.000 km² de terre cultivable ont été perdus par la faute de l'action de l'homme (Dajoz, 1985). L'érosion hydrique est influencée par les opérations culturales, notamment par la profondeur de travail du sol, le sens dans lequel celui-ci se fait, le moment des labours, le type d'instruments aratoires et le nombre de passages (Ritter, 2012). Les pratiques aratoires réalisées dans le sens de la pente favorisent l'érosion hydrique en offrant des voies d'écoulement aux eaux de ruissellement. Généralement, moins le travail du sol perturbe la végétation ou la couche de résidus en surface ou près de la surface, moins le travail du sol engendre d'érosion hydrique. Le travail du sol et les apports d'engrais sont susceptibles d'influencer la sensibilité des terres au ruissellement et à l'érosion, appelée érodabilité (Roose, 1994). L'usage massif d'engrais et la monoculture sont remis en cause pour des raisons de pollution et d'appauvrissement des sols. Les dommages créés par l'érosion sont spectaculaires à certains endroits (Barrere, 1994). L'ameublissement favorise l'infiltration, mais également l'érosion, tandis que le compactage favorise le ruissellement, mais limite l'érosion (Ludwig, 2000).

1-4- PRATIQUES CULTURALES ET EROSION EOLIENNE DU SOL

L'érosion éolienne est le phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre (Bouzid, 2005). Elle s'installe quand :

- Il existe de vents violents et réguliers durant de longues périodes dans la même direction (vents dominants).
- Il s'agit d'un sol à texture grossière, sableux notamment
- Il existe des reliefs atténués sur des grandes étendues plates
- Le climat a une saison sèche entraînant la dessiccation des horizons superficiels du sol et la disparition du couvert végétal.

Les vents violents tels que définis ci dessus sont à la base de cette érosion. L'arrachage, le transport et dépôt des particules de sols sont fonction de la vitesse du vent, mais de la taille et de la densité de ces particules, de l'humidité du sol et du couvert végétal. Les pratiques culturales entraînant la destruction du couvert végétal sont donc des facteurs favorisant l'érosion éolienne. Comme l'érosion hydrique, l'érosion éolienne est néfaste pour le développement économique et l'avenir de l'environnement de l'homme dans les zones propices à son installation (Hamma et karambiri, 2004).

L'érosion éolienne est absente dans les régions du sud Bénin. Elle joue un rôle dans la dégradation du sol, surtout au Nord du Bénin et elle n'est pas alarmante. Elle se rencontre dans les plaines autour de Kandi et Banikoara et à l'extrême Nord (De Haan, 1997).

1-5- EVALUATION DE L'ÉROSION HYDRIQUE

Pour comprendre les processus érosifs et connaître les manières de les combattre, plusieurs techniques d'estimation et de prédiction de l'érosion ont été développées ces dernières années. Il existe alors un grand besoin de données pour spatialiser, évaluer et prédire, à l'aide de modèles, l'effet des changements d'utilisation des terres sur l'érosion des sols. D'une manière générale, la quantification de l'érosion est difficile et dépend des échelles d'espace et de temps considérées. Elle est mesurée directement sur le terrain (mesures directes) ou évaluée à l'aide de modèles prédictifs (mesures indirectes). Si les méthodes de mesure directe et indirecte de l'érosion hydrique, ou plus précisément de son estimation, sont nombreuses (Wischmeier et Smith, 1960 ; Godard et Rapp, 1987), deux méthodes d'estimation de l'érosion dominent (Mabit et *al.*, 2002). La première méthode, porte sur la mesure de pertes en terre par des parcelles expérimentales. Une autre approche consiste à mesurer, à l'exutoire des bassins versants, les flux liquides et solides par l'installation d'une station d'échantillonnage.

1-5-1- Mesures directes

Plusieurs mesures directes permettent de quantifier l'érosion hydrique du sol : mesures topographiques, mesures par parcelles sous pluies naturelles, mesures par simulation de pluie, mesures par l'étude de transport solide et mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues.

1-5-1-1- Mesures topographiques

Elles se basent sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol. On y distingue la mesure par rugosimètre qui consiste à estimer la variation de la hauteur du sol par rapport à un plan de référence, la mesure au moyen des tiges d'acier ou des piquets d'érosion installés en profondeur du sol et utilisés pour mesurer le déplacement du sol (diminution de la profondeur du sol) et le suivi de l'évolution des ravines qui consiste à mesurer la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque événement pluvieux (Délusca, 1998 ; FAO, 2003). La mesure topographique la plus utilisée au Bénin est la mesure au moyen des piquets d'érosion (Hiepe et Junge, 2008). Ces mesures ne permettent pas d'étudier les facteurs conditionnant l'érosion. L'installation de structures dans le sol influence l'environnement local (augmentation de la turbulence pendant le ruissellement) et pose des problèmes de fixation (piquets enterrés ou perdus) (Sogon, 1999).

1-5-1-2- Mesures par parcelles sous pluies naturelles

Les parcelles expérimentales de l'ordre de 1 à 200 m² sous pluies naturelles constituent un moyen privilégié de mesurer l'érosion à l'échelle parcellaire. Les dispositifs utilisés sont décrits dans de nombreuses études références (Wischmeier et Smith, 1978; Roose, 1981; Rishirumuhirwa, 1997). Le type le plus célèbre est constitué par les parcelles de type Wischmeier (Wischmeier et Smith, 1960). La parcelle d'érosion

est un objet naturel, isolé dans l'espace par des limites arbitraires, formant des surfaces pseudo-rectangulaires fermées, débouchant à l'aval sur des cuves pour le stockage de l'eau et des sédiments ce qui permet de quantifier ruissellement et érosion à partir de sa genèse et sur une distance déterminée correspondant à la longueur de la parcelle. Le ruissellement en amont étant coupé, ce dispositif ne donne qu'une image locale du fonctionnement effectif du milieu et pose ainsi la question de la représentativité des mesures. Cependant, il constitue un outil essentiel pour comparer des situations du même ordre de grandeur et surtout pour connaître la dynamique de l'infiltration et les risques de ruissellement et d'érosion (Cheggour, 2008). Ces expérimentations permettent d'étudier les relations entre les pertes en terre et les caractéristiques du milieu telles que sol, pente, végétation, pratiques culturales, etc. (Mabit et *al.* 2002). Les résultats obtenus permettent d'identifier l'impact d'une pratique culturale particulière sur les taux d'érosion et donc de tester les pratiques de conservation des sols. Etant données les variabilités temporelle et spatiale de l'érosion des sols, Loughran (1989) conclut que la plupart des études utilisent trop peu de parcelles expérimentales pour les prendre en compte de façon satisfaisante. Or, la multiplication des parcelles nécessite une infrastructure lourde et coûteuse en matériel et en main d'œuvre. De plus, les surfaces des parcelles sont souvent trop petites (quelques m²) pour être représentatives des conditions naturelles du milieu étudié. Ce manque de représentativité est amplifié par l'isolement topographique de la parcelle expérimentale par des barrières (Sogon, 1999). Les résultats obtenus présentent alors une large part de variabilité inexplicée, ce qui limite l'impact des modèles mathématiques qui en sont tirés et qui rend l'extrapolation à une surface plus large particulièrement délicate (Walling et Quine, 1993).

1-5-1-3- Mesures par simulation de pluie

La simulation de pluie permet d'appliquer artificiellement sur une parcelle expérimentale (en laboratoire ou sur le terrain) une pluie en contrôlant son intensité et sa durée. Elle consiste à produire des averses artificielles contrôlées sur des surfaces limitées (de l'ordre du mètre carré) à l'aide de simulateurs de pluies, afin de mesurer le ruissellement et les pertes en terre induits (Barthès, 1998). Les simulateurs de pluie renseignent sur les processus en jeu (splash, formation de ruissellement et de rigoles) et mesurent l'ampleur de l'ablation (indice d'érodibilité) (Valentin, 1979). Elles sont nettement plus légères à mettre en œuvre sur le terrain que les parcelles d'érosion (Leonard et Andrieux, 1998; Marston et Dolan, 1999; Morgan et *al.*, 1997). La disponibilité, la rapidité des résultats et le contrôle des conditions expérimentales (pluie, sol, pente) font de la simulation de pluie un outil très utilisé dans l'étude de l'érosion des sols (Le Bissonnais et *al.*, 1989). Toutefois, si ces simulations de pluie permettent de simuler de manière satisfaisante les pluies réelles, en volume et en énergie cinétique, elles ne représentent pas correctement l'érosion du sol aux échelles qui nous intéressent, de la parcelle à la région. La nature multi échelles des phénomènes d'érosion comprend des processus successifs de mobilisation et de dépôt de sol, s'enchaînant sur des étendues

nettement supérieures au mètre carré sur lequel les simulations sont réalisées (Cheggour, 2008). La simulation de pluie demeure donc limitée spatialement.

1-5-1-4- Mesures par l'étude de transport de solide

L'étude de transport de solide est réalisée par la mesure des concentrations en matières dissoutes généralement homogènes dans une section. Ces concentrations sont liées à la conductivité qui est facilement mesurable in situ. L'évaluation des volumes de matériaux fins érodés et exportés d'un bassin versant se fait par des mesures conjointes de débits et de concentration en sédiments ou matières en suspension (MES). Ces mesures hydrométriques et de qualité de l'eau (MES) à l'exutoire de petits bassins hydrographiques doivent porter sur plusieurs années pour avoir une représentativité temporelle (sur 10-15 ans pour tenir compte des variabilités climatiques inter-annuelles) (Mabit et *al.* 2002b). Bollinne et Laurant (1983) rapportent qu'aux Etats-Unis, une période de 22 ans est nécessaire pour représenter la pluie de manière satisfaisante. Une estimation sérieuse de l'érosion des sols (intégrant la variabilité, les effets indirects et les événements extrêmes) dépend donc de la durée de l'enregistrement. En effet, les études à court terme sont entachées de grandes incertitudes dans la prédiction à long terme (Walling et *al.*, 1992). Les mesures des exportations de matières grossières par charriage au fond de la rivière sont nettement plus complexes à mettre en œuvre et sont souvent ignorées par les expérimentateurs.

1-5-1-5- Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues.

L'estimation de la quantité des sédiments déposés dans une retenue dépend de deux paramètres : la densité et le volume des sédiments. La densité des sédiments est variable en fonction du temps et en fonction de la position dans la retenue. Elle varie en fonction de la granulométrie, la composition minéralogique, l'épaisseur des dépôts, le niveau de l'eau dans la retenue et l'âge des dépôts (FAO, 2003). De manière générale, on ne peut pas se contenter seulement de la mesure des exportations à l'exutoire, car la seule connaissance de cette donnée ne permet ni de localiser les zones sources de sédiment, ni d'évaluer les pertes en terre que subissent les parcelles constituant ces zones sources (Boiffin, 1994).

1-5-2- Mesures indirectes

Trois mesures indirectes sont utilisées pour estimer et prédire l'érosion hydrique : la modélisation, la télédétection et le Système d'Information Géographique (SIG) et les traceurs radioactifs.

1-5-2-1- La modélisation

La modélisation a pour objectifs d'une part, de tester notre compréhension des processus intervenant dans la dégradation des sols par l'érosion et d'autre part, prévoir les risques futurs sous des conditions variables. Les phénomènes d'érosion sont le résultat

d'interactions complexes variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols, le recours à la modélisation peut constituer un outil d'aide à la décision (FAO, 2003). Les travaux de modélisation de l'érosion sont centrés sur les trois aspects les plus importants de l'érosion des versants (Borges, 1993):

- Les capacités de transport et de détachement des sols par l'impact des gouttes de pluie ;
- Les capacités de transport et de détachement des sols par le ruissellement et
- L'interaction entre les capacités de transport et de détachement, déterminant les taux de transport solide et d'érosion.

Le but de cette partie n'est pas de dresser une liste exhaustive des démarches et modèles existants, mais plutôt de décrire les principales approches développées actuellement. Les modèles d'érosion sont variés, allant des équations dérivées de données empiriques à des modélisations déterministes. Le modèle le plus utilisé est l'Universal Soil Loss Equation (USLE), équation multi-paramètres de prédiction empirique de l'érosion des sols agricoles.

➤ **Les modèles empiriques : cas de l'Universal Soil Loss Equation (USLE : modèle de WISCHMEIER)**

Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule :

$$A \text{ (t/ha/an)} = K * R * L * S * C * P$$

où R est l'indice d'agressivité des pluies ($R = E \times I_{30}$ où E est l'énergie cinétique des gouttes de pluies et I_{30} l'intensité maximale sur 30 minutes), K est l'indice de sensibilité des sols (texture, structure et matière organique), L est la longueur de la pente, S son inclinaison, C'est la modalité d'utilisation des sols et P est le facteur de correction en fonction des pratiques anti-érosives (Wischmeier et Smith, 1978). Le modèle est conçu pour estimer des taux annuels d'érosion sur le long terme dans les zones agricoles, pour des parcelles standard d'environ 100 m² (parcelles dites « de Wischmeier »). Bien que l'équation ait beaucoup de défauts et de limites, elle est très utilisée, du fait de sa relative simplicité et de sa robustesse (Desmet et Govers, 1996). Elle représente aussi une approche standardisée. L'USLE a connu par la suite plusieurs variantes. La "Revised Universal Soil Loss Equation" (RUSLE) (Renard et *al.*, 1997) retient la structure de base de l'USLE en complexifiant la manière d'estimer les différents termes de l'équation. La gamme de variation du facteur R a été élargie à de nouveaux domaines et surtout le facteur LS a été modifié pour pouvoir rendre compte d'une topographie variable. L'équation a subi de très nombreuses adaptations dans le but de l'adapter à l'échelle de l'évènement d'une part, et/ou à l'échelle du bassin versant d'autre part. L'adaptation à l'échelle de l'évènement a été réalisée en remplaçant le paramètre statistique érosivité par une combinaison des débits moyen et maximal d'un évènement donné.

L'adaptation à l'échelle d'un bassin versant a été réalisée en remplaçant le paramètre topographique, initialement conçu pour l'échelle parcellaire, par un paramètre rendant compte de l'accumulation de ruissellement en un point donné, basé sur les aires contributives en amont de chaque point, par exemple celui proposé par Desmet et Govers (1996). Ces modifications sont incluses dans différentes variantes d'USLE, dont les deux principales sont l'équation MUSLE ("Modified USLE ») de Williams (1975), ou USLE-M (« USLE-modified ») de Kinnell et Risse (1998).

Des critiques sévères sont faites à l'USLE. Une relation linéaire entre l'érosion et ses divers facteurs semble une vision dépassée sur le plan logique en raison des effets de seuils (Lilin, 1979). L'impact des gouttes de pluies et la pente ont une influence largement supérieure aux autres facteurs (Michel, 1982 ; Ludwig *et al.*, 1996).

Selon Auzet (1987), on ne peut restreindre et c'est particulièrement vrai dans les régions peu accidentées le rôle de la topographie à un simple critère de gradient et de longueur de pente. Car l'écoulement peut exploiter les moindres micro-reliefs qui peuvent parfois être à l'origine de rigoles et ravins de plusieurs dizaines de mètres. L'USLE sous-estime les taux d'ablation car elle ne prend pas en compte la mobilisation dans le talweg, qui peut être particulièrement intense (rigoles). Elle les surestime d'un autre côté en ne tenant pas compte des redistributions de particules intra-bassin (relais). Pour Walling (1983), l'USLE aboutit à de grandes erreurs d'extrapolation (produit de six petites erreurs).

➤ **Les modèles déterministes (physiques)**

Afin d'étendre l'applicabilité de l'USLE, de nombreux modèles dits physiques ou déterministes ont été mis au point à partir des années 40. Mais ces modèles de prédiction de l'érosion n'ont émergé qu'après les années 1970, avec d'une part, le développement du calcul numérique et d'autre part, un intérêt croissant dans le suivi de la qualité des eaux de surface (Foster, 1990). Durant cette période ont ainsi été développés CREAMS (Knisel *et al.*, 1980) et ANSWERS (Beasley *et al.*, 1980) ou EPIC (Williams, 1985). Sous la tutelle de Lane, le projet WEPP a été lancé pour « développer un modèle à base physique sous une forme facile d'utilisation ». On retrouve des démarches similaires en Europe avec le développement des modèles EUROSEM, (Morgan *et al.*, 1998) ou LISEM (De Roo *et al.*, 1996a, b). Ces modèles physiques distribués sont donc très complexes et nécessitent beaucoup de données en entrée (Ambroise, 1991). Pour diminuer la complexité des modèles physiques, et ainsi améliorer leur potentiel d'utilisation, un nouveau type de modélisation est en plein développement depuis une vingtaine d'années (e.g. TOPMODEL, SWAT). Le modèle SWAT a été utilisé au Bénin pour évaluer le processus de l'érosion sur les bassins versants, surtout à partir des années 1998. Si les modèles basés sur les processus physiques permettent d'améliorer les connaissances des mécanismes de l'érosion, il n'est cependant peut être pas réaliste de vouloir les utiliser comme outil de prédiction de l'érosion des sols (Parsons *et al.*, 1997). De la même manière, Bryan (2000) a montré qu'il n'est pas du tout évident que tous les processus et

interactions impliqués dans l'érodibilité des sols puissent un jour être modélisés physiquement.

1-5-2-2- La télédétection et le Système d'Information Géographique (SIG)

Durant ces dernières années, plusieurs études ont mis en évidence l'intérêt tout particulier d'un Système d'Information Géographique (S.I.G) en tant qu'outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique dans le suivi et la quantification de l'érosion hydrique (Cheggour, 2008). Les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique (SIG) en se fondant sur l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier sont de plus en plus utilisées. Principalement, la télédétection est utilisée pour détecter l'érosion et l'évaluation des facteurs qui la contrôlent. Les systèmes satellitaires optiques ont le plus souvent été appliqués dans les recherches sur l'érosion (Vrieling, 2006). La télédétection permet d'évaluer les facteurs nécessaires au fonctionnement des modèles tels que la longueur des pentes (L) et la pente (S) à l'aide des photographies aériennes et des images satellitaires (Bou Kheir et *al.*, 2001). Actuellement, elles sont exploitées pour estimer le facteur d'occupation et d'utilisation des terres (C) qui évolue rapidement et si nécessaire les pratiques de conservation (P) avec les images à haute résolution spatiale. La spatialisation des modèles de pertes des sols dans un SIG avec l'aide de la télédétection nécessite de faire de nombreuses hypothèses (continuité du paysage, propagation des erreurs, distribution spatiale des pluies intenses, précision des cartes pédologiques, effet des interventions humaines) et la validation sur le terrain n'est vraiment pas aisée (Bonn, 1998).

Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux par utilisation des images satellitaires (King et Le Bissonnais, 1992). L'utilisation de ces systèmes offre un moyen simple, rapide et efficace à l'utilisateur, pour les études d'aménagement et de prise de décision. La télédétection et les SIG constituent des moyens permettant de donner une vue d'ensemble, mise à jour régulièrement, au moyen des unités de paysages sur de vastes territoires, de minimiser le coût des investigations de terrain (meilleur choix des sites à observer, réduction du nombre de campagnes de sondage au sol, gain en temps et en moyens, etc.), de s'affranchir du problème de disponibilité et d'homogénéité de l'information et d'élaborer des cartes délimitant les zones vulnérables et touchées par l'érosion. Par son caractère spatial et temporel, la télédétection reste une source d'information privilégiée pour la régionalisation de l'érosion.

Plusieurs chercheurs ont utilisé la télédétection comme sources de données et les SIG pour la gestion et l'analyse de ces données afin d'estimer et cartographier l'érosion

hydrique, parmi eux, nous citons: Graciela et al., 1996 ; Van Der Knijff et al., 2000 ; Koirala et al., 2007 ; El Garouani et al., 2007 ; Terranova et al., 2009 ; Bou Kheir et al., 2006 ; Meusburger et al., 2010 ; Rejaour et al., 2009 ; Hickey, 2000 ; Sanjay et al., 2002 ; Rakotondraompiana et al., 2011 ; King et al., 2005 ; Ustun, 2008 ; El Bouqdaoui et al., 2005 ; Shbeli, 2005 ; Abaoui et al., 2005 ; Bachaoui et al., 2005 ; Sadiki, 2004 ; Engel, 2003 ; Igué, 2013. Toutefois, très peu de ces résultats ont été validés car il est difficile de mesurer les pertes de sols sur de grandes étendues durant de longues périodes. En conséquence, la validité et la précision de ces cartes sont souvent mises en question (Bonn, 1998) Cette approche ne peut donc en aucun cas dispenser des études de terrain pour établir une compréhension du phénomène et établir des relations entre l'information spectrale et la réalité terrain.

1-5-2-3- Utilisation des radionucléides

❖ Généralités

Les radionucléides (marqueurs radioactifs) constituent une approche assez prometteuse pour étudier les problèmes d'érosion et de dégradation des sols. Leur utilisation dans l'étude de la dynamique érosive en milieu continental remonte aux années 60 avec l'avènement de l'ère « nucléaire » (Mc Henry, 1968). Parmi la large gamme d'isotopes radioactifs présents dans l'environnement, seul un petit nombre peuvent servir de marqueurs des déplacements des particules du sol. Selon Sogon (1999), ces marqueurs doivent avoir :

- une grande affinité chimique vis-à-vis des particules du sol permettant de suivre ces dernières dans leur mouvement à travers le paysage;
- une période radioactive suffisamment longue pour être détectés entre la phase d'échantillonnage et celle de mesure ;
- des caractéristiques propres permettant d'obtenir des informations sur la provenance des particules transportées et les processus en jeu lors des épisodes érosifs (Wallbrink et Murray, 1993) et ;
- Un type de rayonnement, les émetteurs gamma préférables à ceux alpha et bêta, pour leur facilité de détection et d'analyse (Baskaran et al., 1993).

Les radionucléides ainsi retenus pour l'étude des transferts de particules de sol sont principalement le ^{137}Cs et le ^7Be et plus ponctuellement le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$, le ^{134}Cs et le ^{40}K . Deux de ces radionucléides ont fait l'objet d'étude dans cette thèse : le ^{137}Cs et le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$.

➤ Le Césium (^{137}Cs) : C'est un radionucléide artificiel de 30,17 ans ($\lambda = 0,023 \text{ an}^{-1}$). Le césium possède 31 isotopes dont la masse varie de 114 à 145. Parmi eux, seul l'isotope 133 est stable. La période de décroissance radioactive est supérieure à l'année uniquement pour les isotopes 134 (2,2 ans), 135 ($2,9.10^6$ ans) et 137 (30,2 ans). Le ^{137}Cs , émetteur β^- , donne naissance avec un rendement de 94,6 % au $^{137\text{m}}\text{Ba}$ de période 2,55 minutes et avec un rendement de 5,4 % au Baryum 137 stable. Le $^{137\text{m}}\text{Ba}$ conduit au Baryum 137 stable, avec émission gamma (rendement de 85 %). Il est introduit par

l'homme en grande quantité dans l'atmosphère à l'occasion des essais nucléaires et les accidents survenant sur les installations techniques nucléaires. Les retombées atmosphériques ont débuté à la fin des années 1950 pour culminer en 1963 avant de diminuer fortement jusqu'en 1970 où elles atteignent un niveau proche de zéro (Walling et Quine, 1990). Elles disparaissent totalement dans les années 1980 mais l'accident de Tchernobyl en 1986 a entraîné un nouvel apport de ^{137}Cs dont les retombées ont cependant été spatialement très hétérogènes. Comme la majeure partie des essais nucléaires a eu lieu dans l'hémisphère nord, les retombées y ont été beaucoup plus importantes que dans l'hémisphère sud (Cambray et *al.*, 1985).

L'ion Cs^+ est un élément alcalin monovalent qui s'échange avec les ions potassium (K^+), ce qui lui donne une affinité certaine avec les argiles (Livens et Rimmer, 1988). Il est donc fermement retenu par les particules de sol, n'étant à toute fin pratique ni lessivé, ni prélevé par les cultures. Son adsorption sur les plantes est considérée comme uniforme et minimale. Son adsorption sur les particules du sol est irréversible car dépasse la capacité d'échange cationique dans la plupart des sols étudiés. Le ^{137}Cs est retenu dans le sol par un petit nombre de sites très sélectifs (Cremers et *al.*, 1988). La texture du sol a donc une importance négligeable. La fixation du ^{137}Cs est apparemment indépendante des caractéristiques granulométriques du sol car il apparaît clairement que 85% de ce radionucléide se trouvent portés par les argiles qui représentent 25% du total dans le sol (Sogon, 1999). Selon Livens et Baxter (1988), l'adsorption du ^{137}Cs dans les sols sableux et calcaires diminue à cause de leur forte teneur en cations métalliques. Il en est de même lorsque la matière organique est responsable d'une importante fraction de la capacité d'échange du sol (Baeza et *al.*, 1995). Ce dernier aspect a été contesté par Cremers et *al.* (1988) et Hird et *al.* (1995). Selon ces auteurs, la matière organique ne joue aucun rôle dans la fixation du Cs^+ . Ils ont également montré que même dans les sols très organiques, la fraction minérale, si petite soit-elle, est responsable de la fixation du Cs^+ du sol.

➤ L'excès de Plomb ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) : Le ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ ans, $\lambda = 0,031 \text{ an}^{-1}$) est un élément radioactif naturel émetteur β - et γ qui se situe dans la chaîne de décroissance de l'Uranium-238 ($T_{1/2} = 4,5.10^9$ ans). Cet élément descend plus spécifiquement du Radon-222 ($T_{1/2} = 3,8$ jours), élément-fils du Radium-226 ($T_{1/2} = 1620$ ans), qui s'échappe en permanence de la croûte terrestre sous la forme d'un gaz inerte. L'émission de ^{222}Rn dépend de la nature du sol, de la couverture végétale, de la teneur des sols en ^{226}Ra ou encore de leur humidité (Miralles, 2004). On utilise le plomb-210 car c'est le premier descendant du radon-222. Il a une double origine : l'une intrinsèque, supportée par l'Uranium des minéraux (^{210}Pb supporté) ; l'autre atmosphérique, correspondant au ^{210}Pb adsorbé sur ces particules (excès de ^{210}Pb ou $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$). L'excès du ^{210}Pb correspond au ^{210}Pb total auquel on retranche le ^{210}Pb intrinsèque obtenu par les principales raies gamma de ses pères directs, le ^{214}Pb et le ^{214}Bi , supposés à l'équilibre séculaire.

L'affinité du Plomb stable pour les particules est bien connue (Lieser et *al.*, 1986), ce qui en fait un outil très utilisé dans la détermination des taux de sédimentation. Il n'est pas fixé sur les mêmes « sites » que le ^{137}Cs . Les séparations granulométriques montrent

qu'il est concentré sur la fraction argileuse plus grossière (0,5 à 2 μm), plus riche en oxyhydroxyde de fer et corrélativement en matière organique. Certains auteurs (Walling et Quine, 1995 ; Walling et al., 1995 ; Walling et al., 1996 ; Wallbrink et Murray, 1996 ; He et Walling, 1997, Benmansour et al., 2011 ; Benmansour et al., 2014) ont travaillé sur l'utilisation du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ comme marqueur de la redistribution des particules de sol suivant pratiquement les même méthodes que le ^{137}Cs .

❖ **Evaluation des taux d'érosion du sol à l'aide du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$.**

Le principe de base de l'évaluation des taux d'érosion des sols à l'échelle du versant cultivé a consisté à comparer les activités des radionucléides mesurées sur les versants cultivés, soumis aux processus d'érosion, transport et sédimentation, à leurs activités mesurées sur des sites de référence. Le site dit de référence doit remplir un certain nombre de conditions (Campbell et al., 1986 et 1988) : Il ne doit pas être perturbé (labour ou dérangement quelconque) depuis le début des retombées. Il ne doit pas avoir été le siège de déplacement (ni ablation, ni sédimentation) des particules de sol depuis cette même date et il doit être à proximité du versant étudié. Selon Toumi (2013), les sites de référence doivent être plats, ne devraient pas avoir été cultivés au cours des 50 dernières années et de préférence devraient être couverts par des prairies.

Des échantillons de sol sont prélevés sur les sites de référence et les sites d'études. Ces échantillons sont préparés pour déterminer leur activité spécifique en ^{137}Cs et en $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ à partir d'un spectromètre gamma. La chaîne de spectrométrie gamma est composée d'un détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium hyper pur), placé au centre d'une enceinte blindée. Le détecteur est relié à un réservoir d'azote liquide qui assure le refroidissement du détecteur d'une part, et par le biais d'un préamplificateur d'amplitude à une électronique de détection, d'autre part les activités spécifiques du ^{137}Cs doivent être converties en un mouvement du sol en utilisant des modèles de conversion. De nombreux modèles ont été développés au fil du temps. Ils impliquent toutes différentes hypothèses qui se traduisent par des paramètres, dont certains sont spécifiques au site (Fulajtar, 2003). Les modèles utilisés pour convertir l'activité des radioéléments en taux d'érosion du sol sont en fonction de la mise en culture du sol.

Pour les sols non cultivés, deux modèles sont souvent utilisés :

➤ **Modèle basé sur le profil de ^{137}Cs :** La distribution du césium dans des sols stables non perturbés est supposée correspondre à une décroissance exponentielle. H_0 est déterminé à partir des profils des sites de référence. H_0 : Coefficient décrivant la forme du profil de l'inventaire du césium par couche de profondeur de manière à ce que le profil d'inventaire en profondeur soit reproduit : $A(x) = A_0 \cdot e^{-x/H_0}$. L'équation du modèle se présente comme suit : $E = [10/(t-1963)P] \cdot \ln(1-X/100) \cdot H_0$. Comme limite de ce modèle, les retombées totales sont produites en 1963 et le profil de ^{137}Cs dans le sol est supposé indépendant du temps.

➤ **Modèle de diffusion et de migration :** La redistribution du Cs fait intervenir un coefficient de diffusion et un taux de migration. Le taux d'érosion dépend de l'inventaire de ^{137}Cs enlevé et de l'activité en surface du sol (A_{surf}). D et V sont déterminés à partir des

profils de sites de référence et de la profondeur du pic de ^{137}Cs . L'inventaire de Cs érodé est :

$I = \int P \cdot R \cdot A_{\text{surf}}(t') \cdot e^{-\lambda(t-t')} \cdot dt'$ et $A_{\text{surf}}(t') = I(t)/H + \int [(I_t' \cdot e^{-(E/H)})/Dp(t-t')].e^{-v^2(t-t')/4D-I(t-t')} \cdot dt'$
 D = coefficient de migration du ^{137}Cs ($\text{kg}^2 \cdot \text{m}^4 \cdot \text{an}^{-1}$) ; V = vitesse de migration du Cs dans le sol ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$). Ce modèle considère D et V identiques à tous les points, indépendamment de la structure et de la minéralogie des sols, ce qui constitue sa limite.

Pour les sols cultivés, plusieurs modèles sont utilisés selon les données collectées.

➤ **Modèle proportionnel (PM) :** Toutes les retombées de ^{137}Cs sont incorporées et mélangées dans la couche labourée à un instant t et le sol conserve la même activité spécifique au cours du temps. La diminution de l'inventaire est directement associée à la perte des particules chargées en césium. Le taux d'érosion est calculé à partir de l'équation suivante : $E = (10 \cdot B \cdot d \cdot X)/(100 \cdot P \cdot T)$. C'est le modèle le plus simple qui soit, donc avec beaucoup de « simplifications ». P doit être fixé égal à 1 en absence d'expérimentation sur site. Les suppositions sur lesquelles le modèle proportionnel s'est basé sont simples mais la réalité est beaucoup plus complexe. Les retombées du ^{137}Cs sur le sol se sont produites au cours de plusieurs années et l'élément n'est pas aussitôt introduit en profondeur par lessivage ou par mixage par le labour aussi si une partie du ^{137}Cs resté en surface est érodée avant son incorporation dans le sol, le calcul du taux d'érosion par le modèle proportionnel qui implique une comparaison avec un site de référence où le sol est considéré comme stable peut provoquer une surestimation de l'érosion. De même le modèle ne tient pas compte de la teneur en ^{137}Cs incorporé dans le sol sous la couche de labour originale et qui n'a été remanié que plus tard. Cela peut conduire à une sous-estimation des taux d'érosion (Walling et He 1997).

➤ **Modèle simplifié d'équilibre de masse 1 (MBM1) :** Les retombées de ^{137}Cs ont varié dans le temps et les concentrations dans l'horizon labouré ont donc varié également. Cette variation est prise en compte avec la décroissance. Le taux d'érosion est calculé à partir de l'équation suivante : $E = 10 \cdot d \cdot B/P \cdot [1 - (1 - X/100)^{(1/t-1963)}]$. La limite de ce modèle est l'entraînement du ^{137}Cs avant son incorporation dans la couche de labour.

➤ **Modèle simplifié d'équilibre de masse 2 (MBM2) :** L'enlèvement du césium avant son incorporation au sol est prise en compte. Le taux d'érosion est calculé à partir de l'équation suivante : $dI(t)/dt = (1 - \Gamma) \cdot F(t) - (I + P \cdot E/m) \cdot I(t)$ avec $\Gamma = P \cdot \gamma \cdot (1 - e^{-E/H})$. La valeur de γ est calculée à partir des données pluviométriques suivies dans le temps (donnée pas toujours disponible sur les zones d'études).

➤ **Modèle simplifié d'équilibre de masse 3 (MBM3) :** Ce modèle est utilisable uniquement sur des transects parallèles aux pentes des versants, il prend en compte la contribution du labour à l'érosion et sépare l'érosion due au labour et l'érosion hydrique (le ^{137}Cs enlevé peut se retrouver plus bas sur une zone à cause du labour). La pente est divisée en section pour lesquelles on a $E = E_{\text{out}} - E_{\text{in}} + E_{\text{w}}$. L'effet de labour est calculé sur le premier segment de pente (E_{w} supposé nul sur ce segment) et répercuté ensuite en

fonction de la pente et de la longueur des segments. Ce modèle est utilisable uniquement sur des transects parallèles à la pente du versant, ce qui constitue sa limite.

Ces modèles ont pris en compte les paramètres suivants :

E= perte ou gain en sol (t/ha/an) ; X= % de perte ou gain en ^{137}Cs (rapport avec le site de référence) ; B = densité du sol ; d = profondeur de labour ; T = temps écoulé depuis le début de l'accumulation du ^{137}Cs ou année de collecte du sol (MBM1) ; P = facteur de correction granulométrique ou facteur d'enrichissement en ^{137}Cs des particules exportées ; I = Inventaire du Césium ; H = profondeur de migration du ^{137}Cs ; M = poids de colonne de sol labourée (kg/m^2) ; γ = facteur de proportion traduisant la portion de ^{137}Cs des retombées susceptibles d'être mobilisée par l'érosion (quantité de pluie par épisode érosif sur pluviométrie annuelle) ;

Γ = pourcentage de ^{137}Cs déposé et entraîné par l'érosion avant son incorporation dans le labour ;

F(t) = flux des retombées de ^{137}Cs atmosphérique par an depuis 1963 ; Eout = quantité de sol extraite par le labour ; Ein = quantité de sol introduite par le labour de la zone susjacente ; Ew = quantité érodée par l'eau.

CHAPITRE 2

LES PRATIQUES CULTURALES ET LA DEGRADATION DU SOL

Ce chapitre a généré trois articles. Les deux premiers ont été publiés et le troisième est en cours de rédaction (pré-article en annexe).

Article 1 : **Kouelo A. F., Houngnandan P., Azontonde H. A., Dedehouanou H., Gangnon S. A. O. (2015).** Farmer's perceptions on soil degradation and their socioeconomic determinants in three watersheds of southern Benin. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 5(22): 29-39.

Article 2: **Kouelo A. F., Houngnandan P., Dedehouanou H., Tossou R., Bello D., Bekou J., Tchetangni A. (2016).** Farmer's cropping systems characterization: Soil conservation practices in three watersheds of Benin. *African Journal of Agricultural Research* 11(7) : 507-515. Facteur d'Impact : 0,26

2-1- CONTEXTE

Le sol et l'eau sont des ressources de base, vitales et essentielles pour l'agriculture durable. La durabilité implique ici l'utilisation de ces ressources de manière à assurer peu ou pas de dégâts tout en garantissant leur utilisation continue (Ahaneku, 2010). La dégradation des terres est un problème mondial important au cours du 20^{ème} siècle et reste d'une grande importance dans le 21^{ème} siècle car elle affecte l'environnement, la productivité agricole, la sécurité alimentaire et la qualité de vie (Eswaran et *al.*, 2001). Les processus de dégradation des sols comprennent la perte de la couche arable par l'action de l'eau ou le vent, la détérioration chimique tels que l'épuisement des nutriments, la dégradation physique, comme le compactage, et la détérioration biologique des ressources naturelles, y compris la réduction de la biodiversité du sol (Lal, 2001).

Il est également mentionné que la dégradation des sols est induite par le surpâturage, la déforestation et les activités agricoles inappropriées. Cela constitue également une grave menace pour la productivité des terres. L'abandon des pâtures et terrains agricoles dégradés existants, le passage à la nouvelle terre pour le pâturage et la production agricole sont des réponses à la baisse de la fertilité des sols.

Un système agricole décrit ce qui se fait habituellement par un groupe d'agriculteurs opérant sous certaines conditions communes. Le système se concentre sur les systèmes communautaires ruraux du ménage agricole et leurs interactions avec les environnements physiques, socio-culturelles et politiques (Kalisa, 2007). Chaque ferme individu a ses propres caractéristiques, qui découlent de variations dans les dotations en ressources et la situation familiale. Le ménage, ses ressources, et les flux des ressources

et leurs interactions à ce niveau de l'exploitation individuelle sont désignés ensemble comme un système agricole.

Bien que l'agriculture au Bénin occupe 75% de la population (MAEP, 2010), elle n'a pas encore été articulée autour des techniques et des méthodes (les plus modernes) pour satisfaire pleinement les besoins de la population. Son développement ainsi que le niveau de performances de la production (la conservation, la transformation et la commercialisation de produits agricoles) sont limités (SCRP, 2007). Plusieurs stratégies de Conservation de l'Eau et des Sols (CES) ont été développées et se répandent au Bénin par des projets de développement depuis 1960. La prévention de la perte de terre par l'amélioration de la gestion et de la conservation des ressources naturelles est donc importante pour maintenir les fonctions du sol et contribuer à la sécurité alimentaire aujourd'hui et pour les générations futures (Ehui et Pender, 2005). La recherche sur la conservation des sols a été menée depuis de nombreuses années en Afrique subsaharienne (Ehrenstein, 2002) et au Bénin (Saidou, 2005). Les agriculteurs ont été lents à adopter des pratiques de conservation des sols appropriées, qu'ils considèrent exigeantes en travail et en capital durant leur mise en œuvre et leur entretien et aussi comme un gaspillage de terrain (Khisa et *al.*, 2002). Car tout se passe sans aucune référence aux réalités du monde paysan auquel ces technologies sont destinées.

La conception générale du développement agricole qui a prévalu jusqu'à récemment, était basée sur l'existence de deux mondes bien distincts: d'un côté ceux qui savent et qui produisent le savoir (chercheurs, techniciens, politiciens, etc.) et de l'autre ceux qui ne savent pas (paysans) et qui doivent recevoir et appliquer le savoir produit par le premier. D'où l'approche descendante qui a guidé la mise en œuvre de ces technologies. L'importance et la prise en compte du savoir paysan ont été soulignées par certains auteurs déjà vers les années cinquante sans qu'il ne soit réellement considéré par les partenaires au développement. De Leener (2002) a bien dressé l'histoire des savoirs paysans dans la recherche agronomique, histoire caractérisée d'abord par une longue période de négligence de ce savoir malgré la mise en évidence de sa richesse, sa diversité et son adaptation à des exigences économiques, techniques, sociales et culturelles. Ensuite par la reconnaissance de sa valeur et sa timide prise en compte dans les actions de recherche. Le défi est d'écouter et d'apprendre des connaissances des agriculteurs. La connaissance des sols des agriculteurs offre un ensemble différent d'échelles temporelles et spatiales à l'égard de l'utilisation des terres, ce qui a des implications importantes pour l'agriculture durable (Brouwers, 1993; Sandor et Furbee, 1996).

L'accès à la terre est un problème, en particulier dans le sud, où la densité de population est très élevée. La taille des exploitations est en moyenne de 1,7 ha pour une famille de 6 à 7 personnes, tandis que les activités non agricoles restent rares. Les terrains en pente, comme les bassins versants, sont en culture intensive (MAEP, 2007). Mais ils sont plus sensibles à la dégradation et donc ne pouvaient plus nourrir les agriculteurs. Cette population des bassins versants, en insécurité alimentaire de plus en plus aggravante, doit produire plus avec leurs ressources limitées. En conséquence, les

pratiques culturales doivent être plus productives et durables. Il est nécessaire de faire un inventaire des pratiques culturales sur les bassins versants pour identifier les améliorations nécessaires à la production adéquate et durable. Cette étude vise à caractériser les pratiques culturales dans trois bassins versants des régions du sud du Bénin. Elle permettra aussi de connaître la perception des agriculteurs sur la dégradation des sols au Sud Bénin. Les technologies de lutte contre la dégradation du sol (conservation des sols) tiendront compte de ces savoirs paysans pour un taux élevé de leur adoption.

2-2- METHODES

Une enquête a été réalisée entre avril et juin 2013 pour caractériser les systèmes de culture pratiqués sur les bassins versants. Une pré-enquête, conduite en février et mars 2013, a permis de discuter avec des personnes ressources à l'aide d'un guide d'entretien pour identifier les unités de production concernées par les bassins versants. Un questionnaire a été rédigé et utilisé pour l'enquête (Annexe 1). L'unité d'observation de cette enquête est le ménage agricole représenté ici par son chef. Les données qui ont été collectées au cours de l'enquête sont : les caractéristiques socio-démographiques des ménages agricoles, les principales cultures de la zone, la perception des producteurs sur la dégradation du sol et les pratiques culturales adoptées. La taille de l'échantillon (N_0) qui a été enquêtée a été déterminée sur la base d'un échantillonnage aléatoire simple. Le degré de confiance souhaité pour les résultats est de 95% avec une marge d'erreur maximale sur les résultats de 5%. D'après Dagnelie (1998), la taille de l'échantillon a été calculée avec la formule suivante :

$$N = [(U_{1-\alpha/2})^2 \times p(1-p)]/d^2, \text{ avec}$$

$N \geq 50$ et $p \geq 1/10$ de la population cible, N = Taille de l'échantillon par village; $U_{1-\alpha/2}$ = valeur type du degré de confiance; p = proportion de la population cible; d = valeur type de la marge d'erreur.

La taille minimale de l'échantillon (pour p mini = 0,1) calculée est $N = 139$ ménages agricoles soit $N_0 = 139 \times 3$ villages = 417 ménages agricoles enquêtés dans les trois villages.

L'enquête a permis de collecter les données suivantes : Les caractéristiques socio-démographiques : religion, sexe, âge, niveau d'instruction, situation matrimoniale, taille du ménage, alphabétisation, adhésion à une organisation paysanne. Les perceptions des ménages agricoles sur la dégradation du sol, l'appréciation du niveau de la fertilité du sol, les causes de la dégradation du sol et les causes de l'érosion selon les agriculteurs. Elle a permis également d'inventorier les pratiques culturales et de les caractériser. Du semis à la récolte, les principales activités agricoles sont la préparation du sol, la fertilisation, la gestion des cultures et la protection des cultures.

Les données ont été analysées à l'aide du logiciel SPSS 16. Des statistiques descriptives et des fréquences ont été calculées. Le test d'indépendance Khi-2 a été effectué afin de déterminer d'une part la spécificité de la perception des agriculteurs et de leurs déterminants aux bassins versants et d'autre part la spécificité des pratiques culturelles aux bassins versants.

La prise de décision des agriculteurs à adopter ou à choisir ses pratiques culturelles peut-être influencée par ses caractéristiques socio-démographiques. Pour identifier les déterminants socio-démographiques qui affectent l'adoption des pratiques par les producteurs, nous avons choisi d'utiliser le modèle Probit, au regard de la taille élevée de notre échantillon.

Le modèle se présente comme suit :

$Y = f(x, e)$ avec Y = variable dépendante (prédisposition des producteurs à adopter ou non une pratique culturelle) ; X = matrice des variables susceptibles d'expliquer la variation de Y et e = erreur logistique de la distribution.

L'analyse des résultats de ce modèle porte essentiellement sur les points suivants :

➤ *La qualité du modèle*

La qualité du modèle a été appréciée en utilisant la vraisemblance du modèle qui suit une loi de Khi-deux. Le modèle est dit globalement significatif lorsque la valeur de la vraisemblance est supérieure à celle du Khi-deux au même degré de liberté et à un seuil donné (1 %, 5 % ou 10 %). Précisément, le modèle est dit bon lorsque la probabilité du ratio de vraisemblance est inférieure au seuil de signification choisi.

➤ *Les signes de coefficients estimés*

La valeur numérique des coefficients estimés n'a vraiment pas d'intérêt en soi. Par contre, les signes de ces coefficients sont importants. Ils indiquent si la vérification associée influence la probabilité à la hausse ou à la baisse. Autrement dit, ces signes indiquent dans quel sens la variation de la variable explicative influence la variation de la variable expliquée. A chaque signe des coefficients est associée une significativité qui revêt une grande importance. Elle est donnée par une probabilité qui indique dans quel intervalle de confiance le signe peut être utile. Cette probabilité peut être de 90 %, 95 % ou 99 %.

➤ *Modèle empirique*

Soit P_i la probabilité qu'associe le Probit à l'unité d'enquête i

$$P_i = F(Y_i) = 1 / (1 + e^{-Y_i})$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \beta_3 x_{i3} + \dots + \beta_n x_{in}$$

Y_i est déterminé par les caractéristiques (x_{i1} , x_{i2} , x_{i3} , ..., x_{in}) de l'unité d'enquête, de son environnement et de l'objet de son choix; les β_i représentent les coefficients des variables explicatives et les x_{in} représentent les variables explicatives.

Les modèles empiriques s'écrivent :

$$\text{LABOUR}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

$$\text{MULCHING}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

$$\text{ENGRAISMINERAUX}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

$$\text{ASSOLEMENT}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

$$\text{JACHER}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

$$\text{LUTTEPHYTO}_i = \beta_0 + \beta_1 \text{SEXE} + \beta_2 \text{AGE} + \beta_3 \text{RELIGION} + \beta_4 \text{TAILLEMENAGE} + \beta_5 \text{INSTRUCTION} + \beta_6 \text{ALPHABETISATION} + \beta_7 \text{ENCADREMENT} + \beta_8 \text{MEMBREOP}$$

Les variables prises en compte sont de nature sociodémographique selon l'objectif poursuivi. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Caractéristiques des variables

Nom de la variable	Nature des variables	Codes	Modalités	Signes attendus
Variables indépendantes				
Sexe de l'enquêté	Ordinale	SEXE	0=Femme 1=Homme	+/-
Age révolu	Continue	AGE	Nombre d'année	+/-
Religion	Ordinale	RELIGION	0=animiste 1=chrétien 2=musulman	+/-
Taille du ménage	Continue	TAILLEMENAGE	Effectif du ménage	+/-
Niveau d'instruction	Ordinale	INSTRUCTION	0=non instruit 1=primaire 2=secondaire	+/-
Alphabétisation	Ordinale	ALPHABETISATION	0=non alphabétisé 1=alphabétisé	+/-
Appartenance à une organisation paysanne	Ordinale	MEMBREOP	0=pas membre OP 1=membre OP	+/-
Encadrement technique	Ordinale	ENCADREMENT	0=non encadré 1=encadré	+/-
Variables dépendantes				
Labour	Catégorie	LABOUR	1= labour (billonnage et labour à plat) ; 0= non labour (semis direct et minimum labour) ;	
Mulching	Catégorie	MULCHING	1= oui ; 0= non	
Engrais minéraux	Catégorie	ENGRAISMINERAUX	1= oui ; 0= non	
Assolement	Catégorie	ASSOLEMENT	1= oui ; 0= non	
Jachère	Catégorie	JACHERE	1= oui ; 0= non	
Lutte phytosanitaire	Catégorie	LUTTEPHYTO	1= oui (raticides et ou insecticides et ou herbicides) ; 0= non	

2-3- RESULTATS

2-3-1- la perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

2-3-1-1- Caractéristiques des agriculteurs

Les principales caractéristiques des ménages considérés dans l'étude comprennent notamment les caractéristiques sociales et démographiques. Les chefs de ménages sont à prédominance du genre masculin, respectivement 88, 78 et 74% dans les villages de Govié, Lokogba et Linsinlin. Les femmes chefs de ménage sont récemment veuves ou des femmes dont les maris ont voyagé. Alors qu'ils sont pour la plupart de la religion traditionnelle (animiste) dans le village de Linsinlin (97% des agriculteurs), ceux des villages de Govié et Lokogba pratiquent les religions chrétiennes en majorité (54% et 55% respectivement). La plupart des chefs de ménage sont mariés (Tableau 2). Le taux d'immigration est très faible ou nulle dans les villages enquêtés. Le principal mode d'accès à la terre est l'héritage (62% dans le village de Govié, 93% dans le village de Lokogba et 84% dans le village de Linsinlin).

Tableau 2: Caractéristiques sociales des agriculteurs enquêtés.

Variables	Modalités	Fréquence (%)		
		Govié	Lokogba	Linsinlin
Genre	Masculin	122 (87,8)	108 (77,7)	103 (74,1)
	Féminin	17 (12,2)	31 (22,3)	36 (25,9)
Réligion	Animiste	62 (44,6)	63 (45,3)	97 (69,8)
	Chrétien	75 (54,0)	76 (54,7)	42 (30,2)
	Musulman	2 (1,4)	0(0)	0(0)
Situation matrimoniale	Célibataire	20 (14,4)	9 (5,5)	11 (7,9)
	Marié	110 (79,1)	113 (81,3)	126 (90,6)
	Divorcé	3 (2,2)	3 (2,2)	2 (1,4)
	Veuf	6 (4,3)	14 (10,1)	0(0)
Type de ménage	Autochtone	129 (92,8)	139 (100,0)	123 (88,5)
	Allochtone	10 (7,2)	0(0)	13 (9,4)
	Pas de réponses	0(0)	0(0)	3 (2,2)
Mode d'accès à la terre	Héritage	86 (36,7)	130 (93,5)	117 (83,0)
	Don	9 (3,8)	8 (5,8)	16 (11,4)
	Location	53 (22,6)	0(0)	2 (1,4)
	Achat	50 (21,3)	1 (0,7)	3 (2,1)
	Métayage	36 (15,4)	0(0)	0(0)
	Pas de réponses	0(0)	0(0)	3 (2,1)

X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative.

L'âge est un facteur important, qui affecte l'emploi potentiel et la mobilité des personnes interrogées. L'âge moyen des chefs de ménage interrogés est de 45 ans dans le

village de Govié, 40 ans à Lokogba et 39 ans à Linsinlin. La taille moyenne des ménages est de 11 habitants dans le village de Govié et 8 habitants dans les villages de Lokogba et Linsinlin (Tableau 3). Dans les trois villages, on rencontre en majorité des agriculteurs plus âgés et des adultes (30 à 50 ans). Dans les villages de Lokogba et Linsinlin, la plupart des agriculteurs ne sont pas instruits. Dans le premier village, près de 29% des agriculteurs ont le niveau primaire, contrairement aux agriculteurs du deuxième village (12%). Ces résultats sont expliqués par le fait que le village de Lokogba dans la commune d'Aplahoue est très proche du centre urbain d'Azovè (2 km), tandis que le village de Linsinlin dont le centre urbain le plus proche, Bohicon, est à 15 km environ. Dans le village de Govié, le niveau d'éducation est élevé (44%) pour le niveau primaire et 9% pour le niveau secondaire. En effet, ce village de la commune d'Allada est plus proche de son centre urbain, Allada, et aussi plus proche de la capitale économique du Bénin (Cotonou) que les deux autres villages.

Tableau 3: Caractéristiques démographiques des agriculteurs enquêtés

Variables	Modalités	Fréquence (%)		
		Govié	Lokogba	Linsinlin
Age	< 30 ans	14 (10,1)	26 (18,7)	34 (24,4)
	30 – 40	44 (31,6)	56 (40,3)	55 (39,6)
	40 - 50	41 (29,5)	39 (28,1)	30 (21,6)
	50 - 60	26 (18,7)	18 (12,9)	20 (14,4)
	> 60 ans	14 (10,1)	0(0)	0(0)
	Moyen	44,5 ± 9,4	39,3 ± 8,7	38,6 ± 9,8
	Minimum	20	22	24
	Maximum	75	58	60
Taille du ménage	<5	0(0)	1 (0,7)	24 (17,3)
	5 - 10	75 (54,0)	102 (73,4)	91 (65,5)
	10 - 15	63 (45,3)	36 (25,9)	21 (15,1)
	>15	1 (0,7)	0(0)	3 (2,1)
	Moyenne	09 ± 2	8 ± 2	8 ± 2
	Minimum	5	4	3
	Maximum	15	14	16

X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative.

Dans les villages de Govié et de Lokogba, la plupart des agriculteurs ne sont pas membre d'une organisation paysanne contrairement au village de Linsinlin où 58% des agriculteurs sont membres de leur organisation (Tableau 4). La plupart des organisations paysannes sont des forums où les agriculteurs peuvent accéder à des informations et partager des expériences utiles. La principale structure de vulgarisation agricole dans les trois villages étudiés est le Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural

(CARDER). Le taux d'encadrement technique agricole est faible dans les villages de Govié et de Lokogba, mais élevé dans le village de Linsinlin (58%). En dehors du CARDER (Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural), certaines ONG (Organisation Non Gouvernementale) sont également impliquées dans l'encadrement technique des agriculteurs dans les villages de Govié et de Linsinlin, mais à un taux très faible.

Tableau 4: Caractéristiques éducatives et institutionnelles des agriculteurs enquêtés

Variables	Modalités	Fréquence (%)		
		Govié	Lokogba	Linsinlin
Niveau d'instruction	Non instruit	66 (47.5)	89 (64.0)	118 (84.9)
	Primaire	61 (43.9)	40 (28.8)	17 (12.2)
	Secondaire	12 (8.6)	10 (7.2)	4 (2.9)
Alphabétisation	Non alphabétisé	72 (51.8)	139 (100.0)	117 (84.2)
	Alphabétisé	67 (48.2)	0(0)	22 (15.8)
Membre d'Organisation Paysanne	Non membre	121 (87.1)	135 (97.1)	58 (41.7)
	Membre	18 (12.9)	4 (2.9)	81 (58.3)
Encadrement technique	Non encadré	96 (69.1)	96 (69.1)	53 (38.1)
	CARDER	41 (29.5)	43 (30.9)	80 (58.3)
	ONG	2 (1.4)	0(0)	5 (3.6)

X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative.

2-3-1-2- Perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

Les agriculteurs enquêtés perçoivent la dégradation du sol par la baisse de la productivité (Figure 11). Mais les proportions sont les plus importantes dans le village de Linsinlin (96%) qu'à Govié (76%) et à Lokogba (64%). Cette perception est spécifique au bassin versant car la différence de perception selon le site de l'étude est significative au niveau de 1% ($\chi^2 = 45,204$; $p < 0,0001$). Le sexe, la religion et l'alphabétisation ne sont pas des facteurs déterminants de la perception des producteurs de la dégradation des sols (Tableau 5). L'encadrement technique détermine la perception des agriculteurs dans chaque village. En effet, dans le village de Govié, presque tous les agriculteurs non encadrés expliquent la dégradation du sol par la baisse de la productivité des sols, tandis qu'au moins 25% des agriculteurs encadrés par le CARDER l'expliquent par la perte de terre. Cette différence est significative au niveau de 5% ($\chi^2 = 7,844$; $p = 0,02$). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans les autres villages. En effet, dans le village de Lokogba, environ 15% des agriculteurs non encadrés évoquent la perte du sol tandis que presque tous les agriculteurs encadrés par le CARDER évoquent la baisse de la productivité des sols. Dans le village de Linsinlin, tandis que 100% des agriculteurs

encadrés par le CARDER ou les ONG mentionnent la baisse de la productivité des sols, il y a quelques agriculteurs (7%) non encadrés qui ont mentionné la perte de terre pour expliquer la dégradation du sol. L'appartenance à une organisation paysanne est un facteur qui influence la perception de la dégradation des sols dans le village de Linsinlin. En effet, alors que 100% des membres interrogés mentionnent la baisse de la productivité des sols, il y a environ 7% des non-membres qui pensent que la perte de terre est leur perception de la dégradation des sols. Dans d'autres villages, la perception de la dégradation du sol ne varie pas avec l'appartenance à une organisation paysanne.

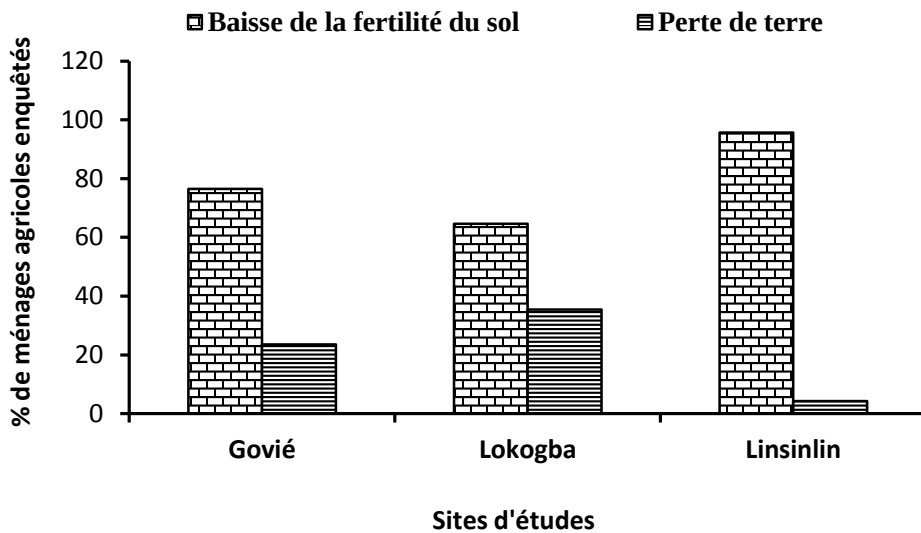


Figure 11 : Perception de la dégradation du sol par les agriculteurs

Tableau 5: Les déterminants de la perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

Sites	Déterminants	Khi-2	Probabilité ($\alpha = 0,05$)
Govié	Genre	0,003	0,955 ns
	Religion	2,74	0,955 ns
	Alphabétisation	0,508	0,476 ns
	Encadrement technique	7,844	0,02**
	Organisation paysanne	0,002	0,962 ns
Lokogba	Genre	1,181	0,277 ns
	Religion	0,192	0,661 ns
	Encadrement technique	4,635	0,063*
	Organisation paysanne	0,498	0,48 ns
Linsinlin	Genre	1,439	0,23 ns
	Religion	0,745	0,388 ns
	Alphabétisation	0,774	0,379 ns
	Encadrement technique	6,378	0,041**
	Organisation paysanne	5,752	0,016**

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%.

ns = non significatif.

3-3-1-3- *Appréciation de la productivité du sol par les agriculteurs.*

Les trois indicateurs les plus cités pour apprécier la productivité des sols par les agriculteurs sont: la croissance des plants, le rendement des cultures et la couleur des feuilles de la plante (Figure 12). Cette appréciation de la productivité des sols par les agriculteurs est spécifique à chaque village ($\chi^2 = 60,91$; $p < 0,0001$). Dans le village de Govié, la croissance des plants et le rendement des cultures sont les indicateurs les plus évoqués par la majorité des agriculteurs, de façon presque égale (35 et 33% respectivement). Mais, dans le village de Lokogba, le rendement des cultures a été cité par 45% des agriculteurs et la croissance des plants par 32%. Et dans le village de Linsinlin, la croissance des plants est l'indicateur le plus cité (51% des agriculteurs) et le rendement des cultures (28%). Les insectes indicateurs (Fourmis, Termites) et les précédents culturels sont presque uniquement mentionnés dans Govié tandis que les plantes indicatrices (*Imperata*, *Digitaria*) ont été évoquées dans les villages de Govié et de Lokogba. Cette différence de l'appréciation de la productivité des sols entre les villages est significative au seuil de 1%.

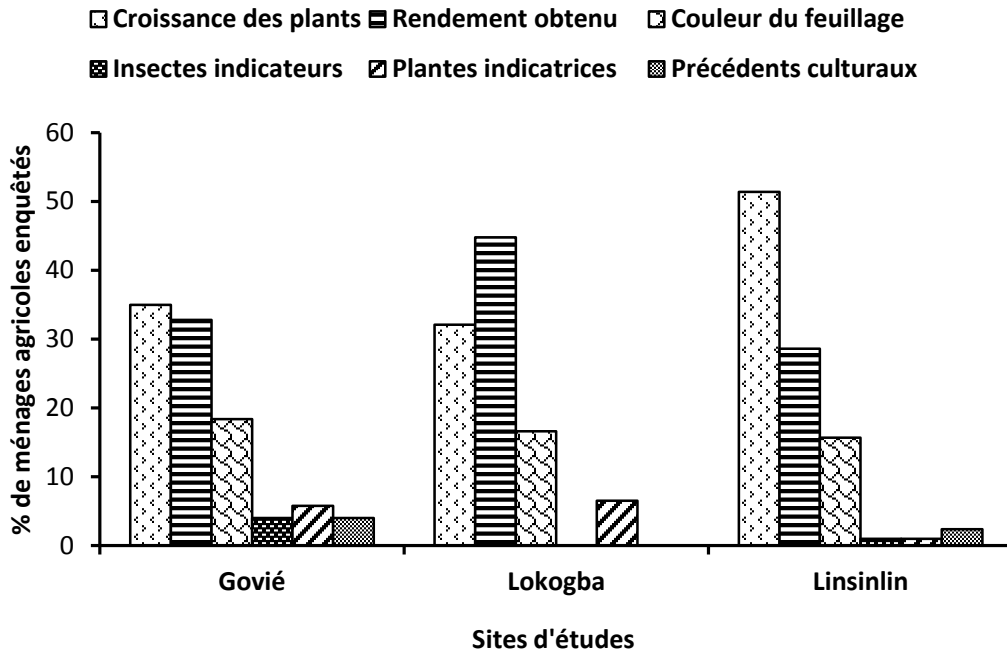


Figure 12 : Appréciation de la productivité des sols par les agriculteurs

Dans les villages de Govié et Linsinlin, le sexe est nettement déterminant dans l'appréciation de la productivité des sols (Tableau 6). En effet, dans le village de Govié, l'appréciation est très variée chez les femmes et comprennent trois indicateurs: la croissance des plants, le rendement des cultures et la couleur des feuilles des plants. Mais la majorité des hommes (87%) évoquent surtout la croissance des plants. Dans le village de Lokogba, le sexe n'a pas d'influence significative sur l'appréciation de la productivité des sols. Dans tous les villages et quelle que soit la religion, la croissance des plants est le seul indicateur le plus mentionné dans l'appréciation de la productivité des sols. Mais dans le village de Govié, l'influence de la religion sur l'appréciation de la productivité des sols est significative, au seuil de 10%. En plus de la croissance des plants, 26% des chrétiens évoquent d'autres indicateurs, principalement le rendement des cultures. L'alphabetisation a une influence significative au seuil de 5% sur l'appréciation de la productivité des sols dans le village de Linsinlin où certains agriculteurs alphabétisés évoquent les plantes indicatrices. Dans le village de Lokogba, il n'y a pas d'alphabétisés.

Tableau 6: Les déterminants de l'appréciation de la productivité des sols par les agriculteurs

Sites	Déterminants	Khi-deux	Probabilité ($\alpha = 0,05$)
Govié	Genre	20,990	0,000****
	Religion	11,354	0,078*
	Alphabétisation	5,750	0,124 ns
	Encadrement technique	3,261	0,775 ns
	Organisation paysanne	12,365	0,006***
Lokogba	Genre	0,876	0,349 ns
	Religion	0,181	0,671 ns
	Encadrement technique	40,114	0,000****
	Organisation paysanne	10,193	0,001***
Linsinlin	Genre	22,678	0,000****
	Religion	5,662	0,129 ns
	Alphabétisation	11,116	0,011**
	Encadrement technique	79,747	0,000****
	Organisation paysanne	34,091	0,000****

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%.

ns = non significatif

Dans les villages de Lokogba et Linsinlin, l'encadrement technique est un facteur qui détermine de façon significative l'appréciation de la productivité des sols. En effet, la majorité (87%) des agriculteurs non encadrés évoquent la croissance des plants, tandis que la majorité (65%) des agriculteurs encadrés par le CARDER ont cité le rendement des cultures comme indicateur.

Dans le village de Linsinlin, la croissance des plants et le rendement des cultures ont été respectivement cités par 53% et 43% des agriculteurs non encadrés. Alors que pour presque tous (92%) les agriculteurs encadrés par le CARDER, la croissance des plants est l'indicateur de l'appréciation de la productivité des sols. Dans tous les villages, l'appartenance à une organisation paysanne (OP) est un facteur important qui détermine l'appréciation de la productivité des sols. En effet, dans le village de Govié, les personnes affiliées à une OP apprécient la productivité des sols en utilisant trois indicateurs : la croissance des plants, le rendement des cultures et la coloration des feuilles des plants. Mais, les personnes non affiliées l'apprécient par les deux premiers indicateurs seulement. Dans le village de Lokogba, la majorité des personnes non affiliées à une OP évoquent la croissance des plants, alors que toutes les personnes affiliées ont mentionné le rendement des cultures comme indicateur de l'appréciation de la productivité des sols. A Linsinlin, les personnes affiliées à une OP ont cité la croissance des plants comme indicateur de l'appréciation de la productivité des sols. En revanche, les non-membres y ajoutent le rendement des cultures.

2-3-1-4- Causes de la baisse de la productivité des sols.

Les agriculteurs enquêtés attribuent plusieurs causes à la baisse de la productivité des sols. Dans le village de Govié, selon la perception des producteurs, la baisse de la productivité des sols est causée par la culture continue, le type du sol et les feux de brousse. Mais, dans le village de Lokogba, la culture continue et l'érosion des sols sont les deux causes citées, alors que dans le village de Linsinlin, la culture continue et les feux de brousse sont les causes de la baisse de la productivité des sols (Figure 13). Les perceptions des agriculteurs sur les causes de la baisse de la productivité des sols varient significativement d'un village à un autre à ($\chi^2 = 4,349$; $P < 0,0001$).

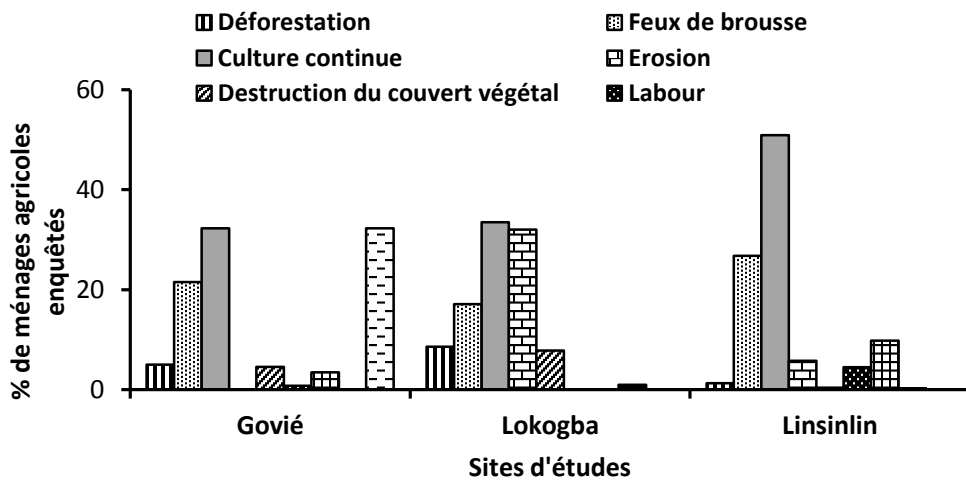


Figure 13 : Causes de la baisse de la productivité des sols selon les agriculteurs

Dans le village de Linsinlin les causes de la baisse de la fertilité des sols varient significativement selon le sexe des agriculteurs. La majorité (61%) des femmes évoquent les feux de brousse, alors que la majorité (62%) des hommes mentionne la culture continue comme causes de la baisse de la fertilité des sols. Dans les autres villages, la perception des producteurs des causes de la baisse de la fertilité des sols n'est pas dépendante du sexe (Tableau 7).

Les croyances religieuses ont influencées significativement la perception des producteurs sur les causes de la baisse de la productivité des sols uniquement dans les villages de Govié et de Lokogba. En effet, dans le village de Govié, les chrétiens ont expliqué la baisse de la productivité des sols par la culture continue (40%), le type de sol (24%) et les feux de brousse (21%). Les musulmans (1,4%) l'expliquent par les feux de brousse alors que les animistes par les feux de brousse (60%) et la culture continue (20%). Dans le village de Lokogba, les chrétiens l'expliquent par la culture continue (25%) et les feux de brousse (58%) et les animistes par la déforestation (33%), les feux de brousse (36%) et la culture continue (30%).

L'alphabétisation est un facteur clé dans la perception des causes de la baisse de la productivité des sols dans le village de Linsinlin. En effet, les personnes alphabétisées expliquent surtout la baisse de la productivité des sols par la culture continue tandis que les non-alphabétisés l'expliquent par les feux de brousse et la culture continue. Dans les autres villages, il n'y a pas d'influence significative de l'alphabétisation sur la perception des causes de la baisse de la productivité des sols.

Dans tous les villages, L'encadrement technique est un déterminant significatif ($P < 0,01$) des causes de la baisse de la productivité des sols perçues par les producteurs. Dans le village de Govié, les agriculteurs non encadrés expliquent la baisse de la productivité des sols par les feux de brousse et la culture continue. Les agriculteurs encadrés par le CARDER l'expliquent non seulement par les feux de brousse, la culture continue mais aussi par le type de sol. Les agriculteurs encadrés par les ONGs l'expliquent par la destruction du couvert végétal. Dans le village de Lokogba, les agriculteurs non encadrés attribuent à la baisse de la productivité du sol les feux de brousse tandis que ceux encadrés l'attribuent à la culture continue. Dans le village de Linsinlin, les agriculteurs non encadrés expliquent la baisse de la productivité du sol par les feux de brousse, ceux encadré par le CARDER l'expliquent par la culture continue et ceux encadrés par les ONGs par la culture continue et le piétinement des animaux. L'appartenance à une OP est un facteur déterminant la perception des agriculteurs des causes de la baisse de la productivité des sols dans les villages de Lokogba et Linsinlin. Dans le village de Lokogba, tous les producteurs appartenant à une OP expliquent la baisse de la productivité du sol par la culture continue tandis que les non-membres l'ont expliquée par la déforestation, les feux de brousse et la culture continue. Dans le village de Linsinlin, les non membres l'ont expliquée par les feux de brousse tandis que appartenant à une OP par la culture continue.

Tableau 7: Les déterminants des causes de la baisse de la productivité des sols vues par les agriculteurs du Sud Bénin

Sites	Déterminants	Khi-deux	Probabilité ($\alpha = 0,05$)
Allada	Genre	5,456	0,363 ns
	Religion	29,067	0,001***
	Alphabétisation	4,254	0,513 ns
	Encadrement technique	70,421	0,000****
	Organisation paysanne	4,835	0,436 ns
Aplahoue	Genre	3,631	0,163 ns
	Religion	7,313	0,026**
	Encadrement technique	68,486	0,000****
	Organisation paysanne	10,947	0,004***
Djidja	Genre	7,993	0,018**
	Religion	2,665	0,264 ns
	Alphabétisation	6,476	0,039**
	Encadrement technique	82,997	0,000****
	Organisation paysanne	39,047	0,000****

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%.

ns = non significatif

2-3-1-5- Perception des agriculteurs sur les causes de la perte de terre

Selon les agriculteurs enquêtés, la perte de terre est un indicateur de la dégradation des sols. Cette perte de terre ou érosion du sol est causée par plusieurs facteurs selon ces agriculteurs. Dans le village de Govié, la pente est la principale cause de l'érosion du sol (31% des agriculteurs), suivie par l'intensité de pluie (24%), les eaux de ruissellement (16%) et la durée de la pluie (15%). Par contre dans le village de Lokogba, la pente et les eaux de ruissellement sont les principales causes de l'érosion (32% et 30% respectivement). Elles sont suivies par l'intensité de pluie (16%) et la durée de la pluie (11%). Plusieurs causes ont été énumérées dans le village de Linsinlin: la durée de la pluie (21% des agriculteurs), le type de sol (17%), la pente (15%), les eaux de ruissellement (14%) et le labour (11%). La perméabilité du sol, le piétinement et la destruction de la végétation sont aussi d'autres causes de l'érosion des sols mais, rarement cités par certains agriculteurs des villages enquêtés (Figure 14)

Les perceptions des agriculteurs sur les causes de la perte de terre varient significativement ($\chi^2 = 2,347$; $P < 0,0001$) d'un village à un autre. C'est seulement dans le village de Govié que le sexe influence la perception des producteurs sur les causes de l'érosion du sol. Les hommes ont expliqué l'érosion des sols par la pente tandis que les femmes l'ont expliquée par non seulement la pente mais aussi par l'intensité de la pluie et la destruction du couvert végétal. La religion et l'alphabétisation, dans tous les villages, ne sont pas des facteurs influençant la perception des producteurs sur les causes de

l'érosion des sols. L'encadrement technique et l'adhésion à une organisation paysanne sont les déterminants significatifs des causes de l'érosion des sols dans le village Linsinlin et non dans les autres villages. La principale cause de l'érosion des sols est la pente selon la perception des agriculteurs non encadrés, la durée de la pluie pour les agriculteurs encadrés par le CARDER et la perméabilité du sol pour ceux encadrés par les ONGs (Tableau 8). La durée des pluies est la principale cause de l'érosion du sol pour les membres d'OP tandis que pour les non membres, l'érosion du sol est causée par la pente.

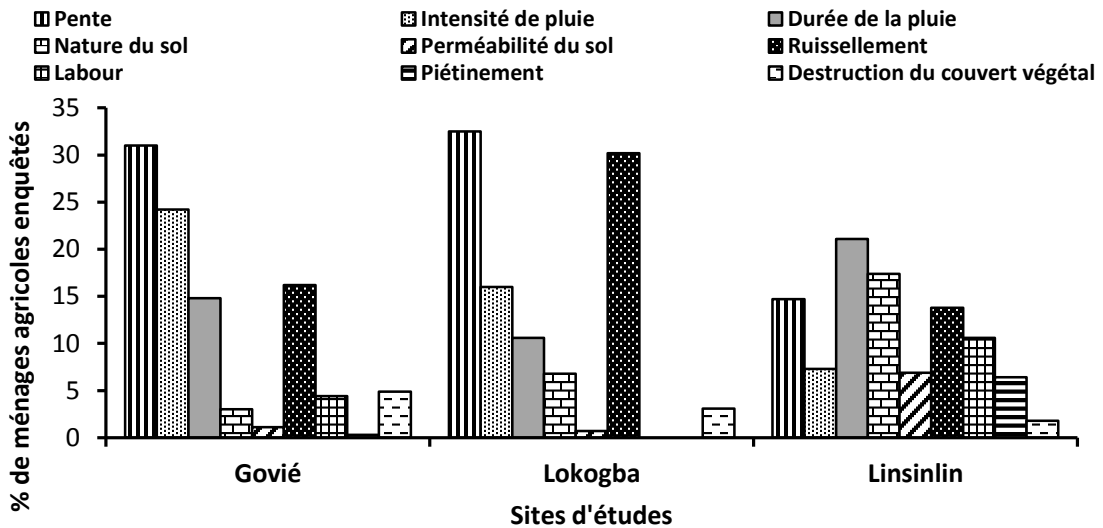


Figure 14 : Causes de la perte de terre selon les agriculteurs.

Tableau 8: Les déterminants des causes de la perte de terre selon les agriculteurs.

Sites	Déterminants	Khi-deux	Probabilité ($\alpha = 0,05$)
Allada	Genre	13,445	0,020**
	Religion	3,606	0,963 ns
	Alphabétisation	6,405	0,269 ns
	Encadrement technique	13,231	0,149 ns
	Organisation paysanne	4,401	0,493 ns
Aplahoue	Genre	0,289	0,591 ns
	Religion	1,215	0,270 ns
	Encadrement technique	2,249	0,134 ns
	Organisation paysanne	0,3	0,863 ns
Djidja	Genre	7,34	0,394 ns
	Religion	9,127	0,244 ns
	Alphabétisation	10,763	0,149 ns
	Encadrement technique	48,384	0,000****
	Organisation paysanne	19,663	0,006****

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%.

ns = non significatif

2-3-2- Les pratiques culturelles sur les bassins versants

2-3-2-1- Les pratiques culturelles

❖ Préparation du sol

Les différentes pratiques de préparation du sol sont significativement spécifiques aux bassins versants étudiés au seuil de 1%. Les bassins versants sur lesquels les agriculteurs pratiquent le billonnage, le sens des billons est aussi spécifique, mais au niveau de 10% (Tableau 9). Dans le village de Govié, trois pratiques de défrichement sont observées: le défrichement sans brûlis (50% des agriculteurs) et le défrichement avec l'incorporation des résidus (12%) sont des pratiques de conservation des sols. Le défrichement avec brûlis, une pratique dégradante du sol, est observé chez 37% des agriculteurs. Dans le village de Lokogba, les deux principales pratiques de défrichement observées sont: le défrichement avec brûlis (pratique dégradante du sol) est observé chez 54% des agriculteurs et une pratique de conservation des sols et le défrichement avec l'incorporation des résidus (43 % des producteurs). Mais, dans le village de Linsinlin, la plupart des agriculteurs pratiquent la culture sur brûlis (défrichement avec brûlis) et contribuent ainsi à la dégradation des sols. Le labour à plat (une pratique dégradante du sol) est le principal type de travail du sol pratiqué dans les villages de Govié (64%) et Linsinlin (81%), tandis que dans le village de Lokogba, le principal type de travail du sol est une pratique de conservation des sols (le minimum labour pratiqué par 53% des agriculteurs). Le semis direct est une pratique de conservation du sol. Il est pratiqué par

les producteurs des villages de Govié et de Lokogba seulement. Dans les villages où le billonnage est pratiqué, les billons sont orientés dans des directions diverses. Dans le village de Govié, les billons sont orientés parallèlement à la pente par 37% des agriculteurs et perpendiculaire à la pente par 41% des agriculteurs. Mais, 22% des agriculteurs ne donnent pas de direction spécifique aux billons. Dans le village de Linsinlin, 37% des agriculteurs orientent les billons parallèlement à la pente et 30% perpendiculairement à la pente. Les billons n'ont aucune direction précise pour 33% des agriculteurs.

Tableau 9: Pratiques de préparation du sol

Variables	Modalités	Fréquence (%)			Total	Khi-2 χ^2	Probabilité $\alpha < 0,05$
		Govié	Lokogba	Linsinlin			
Défrichement	DSB	117 (50,2)	4 (2,7)	9 (6,5)	130 (25,0)	226	0,000
	DAB	87 (37,3)	81 (54,4)	127 (91,4)	295 (56,6)		
	DIR	29 (12,4)	64 (43,0)	3 (2,2)	96 (18,4)		
Labour	Semis direct	46 (22,1)	66 (47,5)	0(0)	112 (22,7)	311,1	0,000
	ML	4 (1,9)	73 (52,5)	28 (19,0)	105 (21,3)		
	Billonnage	132 (63,5)	0(0)	120 (81,0)	251 (50,8)		
	Labour à plat	26 (12,5)	0(0)	0(0)	26 (5,3)		
Sens des billons	Parallèle	53 (37,3)	0(0)	52 (37,1)	105 (37,2)	5,478	0,065
	Perpendiculaire	58 (40,9)	0(0)	42 (30,0)	100 (35,5)		
	SDP	31 (21,8)	0(0)	46 (32,9)	77 (27,3)		

X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative.

DSB = Défrichement sans brûlis; DAB = Défrichement avec brûlis; DIR = Défrichement avec incorporation des résidus;

ML = Minimum labour; Parallèle = Parallèle à la pente; Perpendiculaire = Perpendiculaire à la pente;

SDP = Sans direction précise.

❖ Fertilisation

Les agriculteurs enquêtés utilisent des engrais pour augmenter la productivité de leurs cultures. Dans les villages de Govié et de Linsinlin, aucun agriculteur n'utilise les engrais organiques. Les pratiques de fertilisation dans ces villages sont complètement dégradantes des sols. La majorité des producteurs du village de Govié (87%) n'utilisent pas du tout de fertilisants (agriculture minière) alors qu'à Linsinlin, 81% des agriculteurs pratiquent la fertilisation minérale. Les agriculteurs du village de Lokogba utilisent deux types de fertilisation: la fertilisation minérale pratiquée par 58% des agriculteurs et la fertilisation organique pratiquée par 40% des agriculteurs. Le NPK et l'Urée sont les engrais minéraux utilisés par les agriculteurs. Les ordures ménagères et les déchets animaux sont les engrais organiques utilisés par les agriculteurs (Tableau 10). Il y a une dépendance très hautement significative entre les pratiques de fertilisation et les villages étudiés ($\chi^2 = 378,9$; $p = 0,000$).

Les modes d'épandage des engrais minéraux et organiques par les agriculteurs dans ces villages sont: poquet ouvert, poquet fermé, dépôt sur le sol et épandage en raie. Parmi ces modes, l'épandage à poquet fermé est le plus largement pratiqué à Govié (60%) et Linsinlin (73%). Les agriculteurs du village de Lokogba (88%) déposent plutôt les engrais sur le sol (en particulier les engrais organiques).

Tableau 10: Pratiques de fertilisation

Variables	Modalités	Fréquence (%)			Total	Khi-2 χ^2	Probabilité $\alpha < 0,05$
		Govié	Lokogba	Linsinlin			
Fertilisants	Aucun	123 (87,2)	3 (1,5)	26 (18,6)	152 (31,3)	378,9	0,000
	Minéraux	16 (11,3)	119 (58,3)	113 (80,7)	248 (51,1)		
	Organiques	2 (1,4)	82 (40,2)	1 (0,7)	85 (17,5)		
Mode d'épandage	PO	3 (15,0)	4 (3,6)	32 (23,7)	39 (14,7)	162,98	<0,0001
	DSS	5 (25,0)	98 (88,3)	14 (10,4)	117 (44,0)		
	PF	10 (50,0)	9 (8,1)	87 (64,4)	106 (39,8)		
	Raie	2 (10,0)	0(0)	2 (1,5)	4 (1,5)		

X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative.

PO = Poquet ouvert ; DSS = Dépôt sur le sol ; PF = Poquet fermé.

❖ Systèmes culturaux

La rotation des cultures, la jachère et le mulching sont des pratiques de gestion des cultures des agriculteurs dans les villages de Govié et de Linsinlin. La rotation des cultures est largement pratiquée à Govié (86% des agriculteurs), mais moins pratiquée à Linsinlin (22%). La rotation des cultures n'est pas pratiquée dans le village de Lokogba (Tableau 11). La jachère est pratiquée par la plupart des agriculteurs (91%) du village de Govié. Dans le village de Linsinlin, la jachère de courte durée est pratiquée par 44% des agriculteurs. Ces résultats montrent que le village de Lokogba est sous une pression

foncière élevée contrairement aux autres villages où la pression est plus faible. Le mulching n'est pratiqué dans le village de Govié que par 19% des agriculteurs. Ces pratiques de gestion des cultures varient significativement au seuil de 1% d'un village à un autre.

Tableau 11: Systèmes culturaux

Variables	Modalités	Fréquence (%)			Total	Khi-2 χ^2	Prob $\alpha < 0,05$
		Govié	Lokogba	Linsinlin			
Rotation	R0	20 (14,4)	139 (100,0)	108 (77,7)	267 (64,0)	112,0	0,000
	Rotation	119 (85,6)	0(0)	31 (22,3)	150 (36,0)		
Jachère	J0	16 (11,2)	139 (100,0)	71 (80,7)	226 (61,1)	112,1	0,000
	Jachère 1	121 (84,6)	0(0)	16 (18,2)	137 (37,0)		
	Jachère 2	6 (4,2)	0(0)	1 (1,1)	7 (1,9)		
Mulching	M0	113 (81,3)	139 (100,0)	139 (100,0)	391 (93,8)	55,46	0,000
	Mulching	26 (18,7)	0(0)	0(0)	26 (6,2)		

Prob = Probabilité ; X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative ; R0 = Pas de rotation; J0 = Pas de jachère; M0 = Pas de mulching; Jachère 1 = 1 à 2 ans; Jachère 2 = 2 à 5 ans.

❖ Protection des cultures

Les pertes de récolte enregistrées dans les exploitations agricoles sont dues à des dommages causés par des agents pathogènes, des maladies et des ravageurs. Les mesures préventives sont mises en œuvre par les agriculteurs pour limiter les dégâts causés par ces organismes nuisibles. Ces mesures préventives varient significativement au seuil de 1% d'un village à un autre. Les mesures de prévention les plus utilisées dans le village de Govié sont le sarclage (39%), les pièges (26%) et le pare-feu (17% des agriculteurs). Dans le village de Lokogba, le désherbage est la principale mesure préventive pratiquée par 94% des agriculteurs. Les mesures préventives pratiquées par les agriculteurs du village de Linsinlin sont principalement le sarclage (23% des agriculteurs) et le pare-feu (19% des agriculteurs). Dans ce village, 54% des agriculteurs ne pratiquent aucune mesure préventive (Tableau 12).

Pour lutter contre les organismes nuisibles, les agriculteurs utilisent des mesures curatives telles que l'utilisation des herbicides, nématicides, rodenticides, insecticides, fongicides et des extraits aqueux des plantes. Ces mesures curatives sont des pratiques spécifiques aux villages enquêtés au niveau de 1%. Les herbicides sont utilisés par 12% des agriculteurs du village de Lokogba et rarement utilisés par les agriculteurs du village de Govié (2%). Les herbicides les plus utilisés sont : Kalach (Glyphosate 360g/l) et Lagon (75 g/l d'isoxaflutole et 500 g/l d'Alconifen). Ceux-ci sont achetés sur le marché local et pulvérisés à une dose de 4 litres.ha⁻¹ au moins un mois avant le semis de la culture et à la floraison des mauvaises herbes. Les agriculteurs dans le village de Linsinlin n'utilisent pas d'herbicides.

Contrairement aux herbicides, les agriculteurs utilisent des insecticides contre les ravageurs. Les insecticides sont utilisés par la majorité des agriculteurs de Lokogba (79%). Ce sont des Lambda super (Lambda-cyhalothrine 25g/l) et K-Optimal (Lambda-cyhalothrine 15g/l et Acetamipride 20g/l) pulvérisés à une dose de 0,5 litres.ha⁻¹ et le Pacha (Lambda- cyhalothrine 15g/l et Acétamipride 10g/l) à une dose de 1 litre.ha⁻¹. Ces insecticides sont achetés au marché ou fournis par les agents de vulgarisation du CARDER. Les cultures bénéficient d'un traitement insecticide par semaine pendant trois semaines. Tous les agriculteurs du village de Linsinlin utilisent des insecticides tels que Lambda super, Diméthoate et Cypercal (Cyperméthrine 50g/l). Ces insecticides sont principalement fournis par les agents du CARDER et sont pulvérisés à une dose de 0,75 litre.ha⁻¹ en 3-4 applications hebdomadaires. Les traitements interviennent après la floraison. Les rotenticides sont utilisés par 9% des agriculteurs uniquement dans le village de Govié. L'utilisation des extraits aqueux pour lutter contre les ravageurs est une pratique inexistante. Elle est pratiquée dans le village de Lokogba par seulement 5% des agriculteurs.

Tableau 12: Pratiques de protection des cultures

Variables	Modalités	Fréquence (%)			Total	Khi-2 χ^2	Prob $\alpha < 0,05$
		Govié	Lokogba	Linsinlin			
Mesures préventives	PMP	20 (9,1)	3 (2,3)	57 (57,6)	80 (17,9)	291,2	0,000
	Pare-feu	38 (17,4)	0(0)	19 (19,2)	57 (12,8)		
	Désherbage	85 (38,8)	120 (93,8)	23 (23,2)	228 (51,1)		
	Pièges	57 (26,0)	0(0)	0(0)	57 (12,8)		
	Chasse	17 (7,8)	0(0)	0(0)	17 (3,8)		
	Epouvantail	0(0)	4 (3,1)	0(0)	4 (0,9)		
	RP	2 (0,9)	1 (0,8)	0(0)	3 (0,7)		
Méthodes de lutte chimique	Herbicides	3 (2,2)	18 (11,6)	0(0)	21 (5,4)	343,4	0,000
	Insecticides	9 (6,5)	123 (79,4)	96 (100,0)	228 (58,5)		
	Rodenticides	13 (9,4)	0(0)	0(0)	120 (30,8)		
	Extraits acqueux	0(0)	8 (5,2)	0(0)	13 (3,3)		
	PLC	114 (82,0)	6 (3,9)	0(0)	8 (2,1)		

Prob = Probabilité ; X(Y) : X = Fréquence absolue et Y = Fréquence relative ; PMP = Pas de mesures préventives ; RP = Récolte précoce ; PLC = Pas de lutte chimique.

2-3-2-2- Les déterminants de l'adoption des pratiques culturales

L'adoption d'une pratique culturale peut-être influencée par les caractéristiques sociales et démographiques des agriculteurs (Tableau 13).

❖ Labour

L'adoption d'un type de labour est significativement (au seuil de 1%) influencée par le niveau d'instruction, l'encadrement technique et l'appartenance à organisation

paysanne. En effet, le travail du sol (billonnage et labour à plat) a été adopté par les agriculteurs non instruits, non encadrés et membre d'une organisation paysanne. La pratique du non labour (semis direct et minimum labour) est adoptée par les producteurs qui ont un niveau d'instruction élevé, encadrés par les agents de vulgarisation et qui n'appartiennent à aucune organisation paysanne.

❖ **Mulching**

Les variables telles que la taille du ménage, l'alphabétisation, l'encadrement technique et l'appartenance à une organisation paysanne influencent significativement la pratique de mulching. Les trois premières variables l'influencent positivement, alors que la dernière l'influence négativement. En d'autres termes, plus la taille du ménage est élevée, les agriculteurs ont tendance à adopter le mulching.

Tableau 13: Résultats du modèle Probit d'estimation des facteurs sociodémographiques qui influencent l'adoption des pratiques culturelles

Facteurs	Labour	Mulching	Engrais minéraux	Assolement - Rotation	Jachère	Lutte chimique
Sexe	-0,3852194	-0,6050799	-0,1515858	0,2778908	-0,191337	0,1897414
Age	-0,0082169	-0,0241685	-0,0343277**	0,0359646**	0,0457572***	-0,0241728*
Taille du ménage	-0,0823838	0,2098718*	-0,0053858	-0,0045216	0,0427613	0,0262067
Niveau d'instruction	-0,8499955***	-0,538103	0,6017463**	-0,5334635**	-0,4249596	0,7932932***
Alphabétisation	-	1,625226**	-1,704552***	2,446864***	3,017511***	-2,604122***
Encadrement	-1,515332***	0,6497304*	0,5208803**	0,1646305	-0,2740129	0,1710393
Membre d'une OP	2,858555***	-1,902754**	0,3687746	0,0388879	-0,4074625	0,3589384
Constante	3,182409***	-3,419297***	1,796959***	-2,679139***	-3,114487**	1,066676**
	Log likelihood = -134,92 ; N=328 ; LR chi2(6)= 64,97; Prob > chi2 = 0,0000; Pseudo R2=0,1940	Log likelihood = -86,538887 ; N=417 ; LR chi2(7)= 21,57; Prob > chi2=0,0030; Pseudo R2=0,1108	Log likelihood = -255,34097 ; LR chi2(7)= 52,35 ; Prob > chi2=0,0000; Pseudo R2=0,0930	Log likelihood = -232,29758 ; N=417 ; LR chi2(7)= 80,22; Prob > chi2=0,0000; Pseudo R2=0,1472	Log likelihood = -209,27531 ; N=417 ; LR chi2(7)= 116,36 ; Prob > chi2=0,0000; Pseudo R2=0,2175	Log likelihood = -248,45678 ; N=417 ; LR chi2(7)= 67,61 ; Prob > chi2=0,0000; Pseudo R2=0,1198

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%. ns = non significatif

Tous les modèles estimés sont globalement significatifs au seuil de 1% traduisant que les facteurs pris en compte permettent d'expliquer effectivement chacune des variables dépendantes.

Les producteurs alphabétisés ou encadrés par les agents de vulgarisation pratiquent le mulching. Par contre, les producteurs membres d'une organisation paysanne ne pratiquent pas le mulching.

❖ **Engrais minéraux**

La décision des agriculteurs d'utiliser les engrais minéraux est influencée positivement par leur niveau d'instruction et leur encadrement technique; et négativement par l'âge et l'alphabétisation. Les producteurs qui ont un niveau d'instruction élevé ou encadrés par les agents de vulgarisation ont adopté l'utilisation des engrais minéraux. Les agriculteurs les plus âgés ou alphabétisés n'utilisent pas les engrais minéraux.

❖ **Assolement – Rotation**

La pratique de l'assolement – rotation est adoptée par les agriculteurs les plus âgés ou alphabétisés alors que ceux qui ont un niveau d'instruction élevé ne la pratiquent pas.

❖ **Jachère**

L'âge et l'alphabétisation sont les deux caractéristiques sociodémographiques qui influencent l'adoption de la pratique de la jachère. Cette pratique est adoptée par les agriculteurs alphabétisés ou les plus âgés.

❖ **Lutte chimique**

Les caractéristiques sociodémographiques influencent aussi significativement l'adoption de la lutte chimique contre les organismes nuisibles. En effet, les pesticides sont utilisés dans les exploitations agricoles par les producteurs non alphabétisés ou les plus jeunes d'âge ou encore ayant un niveau d'instruction élevé.

2-4- DISCUSSION

La perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

Si les agriculteurs perçoivent la dégradation des sols comme un problème, la chance qu'ils investissent dans des mesures de gestion des sols sera améliorée. Cette étude a montré que l'érosion du sol et la baisse de la fertilité des sols sont les principaux indicateurs de la dégradation des sols selon la perception des agriculteurs. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par Adimassu *et al.* (2013), qui ont montré que les agriculteurs éthiopiens percevaient l'érosion hydrique et la baisse de la fertilité des sols comme principaux indicateurs de la dégradation des terres. Les agriculteurs ont leur propre perception à évaluer les problèmes, les causes et les conséquences de la dégradation des sols (érosion des sols et la baisse de la fertilité des sols (Kassa *et al.*, 2013). D'autres études (Bewket et Sterk, 2002; Bekele et Drake, 2003; Gebremedhin et Swinton, 2003) ont également montré que la dégradation des sols est perçue par les agriculteurs à travers l'érosion du sol et la baisse de la fertilité des sols. Les perceptions sur la dégradation des sols des agriculteurs varient d'un endroit à l'autre et d'un ménage à un autre en raison des variations des conditions socio-culturelles, économiques et biophysiques (Nederlof et Dangbegnon, 2007). Dans l'Etat de Osun au Nigeria, l'érosion

du sol est perçue comme la principale cause de la dégradation des terres et 69% des agriculteurs ont attribué le faible niveau de récolte à la dégradation des terres (Awoyinka et *al.*, 2005). La perception des agriculteurs de la dégradation des sols se réfère à la perception de la relation entre les processus d'érosion du sol et la fertilité du sol (Belay, 2014).

Dans la zone d'étude, la baisse de la fertilité des sols est causée principalement par la culture continue, le type du sol et les feux de brousse. Les résultats d'Adégbidi et *al.* (1999) dans le nord du Bénin ont indiqué que les principales causes de la baisse de la fertilité des sols (définition de la dégradation des sols dans cette zone d'étude) sont la déforestation, la surexploitation (de la culture continue) et les feux de brousse. Les agriculteurs de la zone soudanienne du Bénin perçoivent de la même manière l'érosion des sols par la déforestation, la pente, le ruissellement, les feux de brousse, le piétinement des animaux, la destruction du couvert végétal et les mauvaises pratiques agricoles (Avakoudjo et *al.*, 2011). Dans le sud de l'Ethiopie (Moges et Holden, 2006), le plus important indicateur de la perception de la baisse de fertilité des sols a été la chute du rendement des cultures, suivie par la faible productivité des cultures et la décoloration ou le jaunissement des plants.

Les principales causes de l'érosion du sol du district de Dejen en Ethiopie (Belay, 2014), comme à Allada, Aplahoué et Djidja au Bénin, perçus par les agriculteurs, étaient la pente du terrain, la déforestation, les mauvaises pratiques agricoles, la forte intensité des pluies et l'absence des pratiques de conservation du sol appropriée. Au Kenya, les agriculteurs ont également attribué l'érosion des sols à la forte pluviométrie et aux pentes raides (Okoba et De Graaff, 2005). Les principales causes de l'érosion ont été le tassement du sol et la déforestation, surtout la pente et le ruissellement ont été citées comme des facteurs majeurs. Globalement, les causes et les facteurs évoqués ici ont été décrits précédemment dans d'autres régions.

Dans la Région North-Est (du Ghana, les perceptions des agriculteurs sur les causes de l'érosion sont: forte intensité de précipitations, la couverture végétale insuffisante, la déforestation et le manque de pratiques de conservation appropriées (Fariya et Farida, 2015). Les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs influencent significativement la perception des agriculteurs. Le niveau d'instruction et l'appartenance à une organisation paysanne font prendre conscience aux agriculteurs sur les problèmes de dégradation du sol (Awoyinka et *al.*, 2005). Dans le bassin versant de Samanalawewa (Sri Lanka), les déterminants socio-économiques de l'érosion des sols sont, entre autres, l'éducation, l'appartenance à l'organisation des agriculteurs, l'encadrement technique, la taille du ménage, le régime foncier, la main-d'œuvre agricole, le revenu, etc. (Udayakumara et *al.*, 2010). Les résultats de Denboba (2005) ont montré que le niveau d'instruction, d'alphabétisation et d'encadrement technique du chef de ménage déterminent significativement la perception des agriculteurs sur le déclin de la productivité des sols.

Les pratiques culturales

La conservation des sols est la prévention des sols contre l'érosion ou la baisse de la fertilité du sol causée par la surexploitation, l'acidification. L'agriculture sur brûlis et d'autres méthodes non durables de l'agriculture de subsistance sont pratiquées dans certaines régions les moins développées (FAO, 1996). La dégradation des propriétés chimiques et physiques suivant le défrichement des terres agricoles est généralement attribuée aux conditions climatiques agressives, la fragilité du sol et la minéralisation rapide des matières organiques, qui augmentent les pertes par érosion et par drainage. Le taux élevé de dégradation des sols observée après le défrichement n'est donc pas seulement causée par l'érosion accélérée et les pertes d'éléments nutritifs par le lessivage. Le défrichement supprime la biomasse et la litière des feuilles et expose le sol. Le défrichement et le brûlis accélèrent la minéralisation de la matière organique du sol. Une minéralisation rapide d'humus, des racines et des débris végétaux de surface continue, même pendant quelques années après le défrichement (Roose, 1986). Cette baisse de la teneur en matière organique du sol résulte de la diminution des activités de la mésofaune et de la microflore du sol. Le Travail du sol provoque des changements préjudiciables à la structure du sol, à la fertilité et à l'émission des gaz à effet de serre (Mrabet, 2002). Le labour intensif tend à réduire la teneur de la matière organique du sol (SOM) en provoquant son oxydation (Wood et *al.*, 2000). Quand la teneur en matière organique du sol chute, les sols deviennent plus compacts, incapables d'absorber et de retenir l'eau, et plus sujets à des pertes d'eau par évaporation et ruissellement rapide. La sensibilité à la l'érosion éolienne et hydrique augmente, ce qui affecte négativement la qualité de l'air et de l'eau (FAO, 2003). Le nombre et le type de microorganismes du sol diminuent également, entraînant une réduction du cycle des éléments nutritifs et les fonctions de régulation que ces communautés assurent (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Le labour de conservation couvre une gamme de pratiques qui conservent l'humidité du sol et réduisent l'érosion du sol par le maintien d'un minimum de 30% de la surface du sol couverte par les résidus après le défrichement.

Généralement, le labour de conservation est un travail profond du sol sans retournement, à savoir l'absence de labour ou le travail réduit du sol ou peu profond avec dent ou disques (Peigné et *al.*, 2007). Le labour de conservation laisse un paillis organique à la surface du sol, ce qui réduit le ruissellement, augmente la matière organique du sol en surface (SOM) et promeut une plus grande stabilité des agrégats qui limite l'érosion des sols (Franzluebbers, 2002). La réduction de l'intensité du travail du sol diminue la consommation d'énergie et les émissions de dioxyde de carbone, tout en augmentant la séquestration du carbone (Hollande, 2004). Les conséquences écologiques négatives des engrais minéraux ont atteint des proportions menaçantes. Cela concerne l'azote synthétique en particulier. Il réduit la teneur en humus et la biodiversité dans le sol, provoque l'acidification des sols et donne lieu à des émissions d'oxyde nitreux, un gaz à effet de serre puissant provoquant un changement climatique qui va nuire à la production alimentaire. L'augmentation de l'acidité du sol diminue l'absorption de phosphates par les

cultures, accroît la concentration d'ions toxiques dans le sol, et inhibe la croissance des cultures. L'épuisement des humus dans le sol diminue sa capacité à stocker les nutriments. Les gaz à effet de serre proviennent de l'excès d'azote qui nuit au climat (Kotschi, 2015).

Les produits chimiques (engrais et pesticides) dans la plupart des pays d'Afrique subsaharienne ont des effets négatifs sur la santé humaine et sur l'environnement. Au Bénin, il y a 70 morts en 2000 et 24 décès en 2001, qui ont été enregistrées pendant les saisons de production cotonnière en raison d'intoxications par des produits chimiques (IAASTD, 2009). Les risques d'effets indésirables sur la santé dus à l'utilisation des pesticides sont souvent exacerbés dans les pays en développement par le manque d'accès à l'information, l'analphabétisme des agriculteurs et de l'équipement de protection indisponible ou inabordable (Maumbe et Swinton, 2003).

Sachant que les agriculteurs dans le sud du Bénin sont fortement intégrés dans une économie des échanges commerciaux, nous nous attendions à adopter la plupart des pratiques de conservation des sols qui leur ont permis de maintenir le niveau de leurs revenus sur de plus en plus petites exploitations. Mais, paradoxalement, ce n'est pas le cas. Ces technologies ont connu un taux d'adoption très faible malgré la prise de conscience des agriculteurs du phénomène de la dégradation des terres (Floquet et Mongbo, 1998). Pour l'instant, ces technologies souffrent d'une certaine irrationalité rapport aux conditions socio-économiques actuelles des agriculteurs et les relations sociales auxquelles ils sont confrontés. Eicher et Baker (1984) rapportent les trois principaux obstacles à l'adoption de pratiques agricoles novatrices: la petite taille des exploitations et des parcelles, la trop grande diversité de la production et la compétence technique des agriculteurs.

Les déterminants de l'adoption des pratiques culturales

Pour certains auteurs (Gowing et Palmer, 2008) l'effort de transfert de technologie en Afrique subsaharienne est insuffisant. Il est limité à des essais de démonstration dans les champs et, malgré des années d'investissement dans la recherche et le développement, les agriculteurs n'adoptent pas les techniques de conservation agricole (Hove et Twomlow, 2007 ; Lal, 2007 ; Rockstrom et *al.*, 2007 ; Twomlow et *al.*, 2008). Il y a deux étapes essentielles dans la décision de mise en oeuvre des techniques de conservation des sols par un agriculteur (Brett, 2004 ; Sall et *al.*, 2000) : la première est la décision d'adopter ou de ne pas adopter la technologie, et la seconde consiste à déterminer le niveau ou l'intensité d'utilisation de la technologie. De nombreuses études ont analysé les variables qui influencent l'adoption de nouvelles technologies dans le secteur agricole (Doss, 2006 ; Kabunga et *al.*, 2012 ; Matuschke et Qaim, 2009). Ngondjeb et *al.* ont montré en 2011 au Cameroun que les facteurs qui influencent la décision de l'adoption des technologies de conservation des sols par les agriculteurs sont entre autres l'âge des agriculteurs et leur appartenance à un groupe (Religion et Organisation paysanne). L'influence de l'âge sur l'adoption des pratiques de conservation peut-être négative (Gedikoglu et McCann, 2007 ; Ward et *al.*, 2008) ou positive (Ghazalian et *al.*,

2009 ; Gedikoglu *et al.*, 2011). L'influence négative de l'âge sur l'adoption dans la présente étude est conforme avec les conclusions d'une étude au Kenya (Odera *et al.*, 2000) qui rapporte que l'âge influence négativement l'adoption de pratiques de restauration de la fertilité des sols. Ce résultat est également en accord avec des études en Ethiopie (Bekele et Holden, 1998), aux Philippines (Lapar et Pandey, 1999), au Burkina Faso (Ayuk, 1997) et au Cameroun (Gockowski et Ndoumbe, 2004). La probabilité d'adoption plus élevée chez les jeunes agriculteurs peut s'expliquer par la tendance de ces derniers à être plus novateurs en raison de leurs horizons de planification sur le plus long terme. Les exploitants plus âgés ont un horizon de planification plus court (Abdulai et Huffman, 2005). L'âge réduit donc l'adoption (Anderson *et al.*, 2005; Foltz et Chang, 2002). Ils valorisent moins les bénéfices à long terme de certaines innovations. Cependant, les jeunes exploitants sont souvent soumis à des contraintes financières fortes ce qui peut les dissuader d'investir dans une nouvelle technologie. Mais, en présence d'un successeur, l'âge de l'exploitant accroît les chances d'adoption d'une innovation. En effet, si une possibilité de reprise de l'exploitation existe, alors l'horizon de planification de l'agriculteur est plus long (Rodríguez-Entrena et Arriaza, 2013). Le niveau d'instruction des agriculteurs est généralement reconnu comme favorisant l'adoption des technologies innovantes (Abdulai et Huffman, 2005; Barham *et al.*, 2004; Foltz et Chang, 2002; Mariano *et al.*, 2012 ; Sauer et Zilberman, 2009 ; Tosakana *et al.*, 2010). Même si certains travaux ne trouvent pas de relations significatives entre l'éducation et l'adoption (Knowler et Bradshaw, 2007 ; Ngondjeb *et al.*, 2011), on peut considérer que les agriculteurs les plus éduqués disposent de plus d'informations leur permettant de mieux évaluer l'innovation et ainsi de limiter leur niveau d'incertitude. La taille du ménage a aussi une influence positive sur l'adoption des pratiques de conservation (Ngondjeb *et al.*, 2011). L'encadrement technique (visites des conseillers des Chambres d'Agriculture, informations des centres techniques agricoles, conseil agricole) et les organisations paysannes (réseaux de producteurs, forum, *etc.*) ont un effet sur l'adoption d'innovations (Barham *et al.*, 2014; Marra *et al.*, 2003). On retrouve dans la très grande majorité des études un effet positif de l'encadrement technique ou du conseil agricole sur l'adoption d'innovation (Knowler et Bradshaw, 2007; Prager et Posthumus, 2010; Prokopy *et al.*, 2008; Rubas, 2004). Parcell et Gedikoglu (2013) développent un modèle d'analyse prenant en compte la coopération entre les agriculteurs pour expliquer l'adoption de pratiques de conservation liées à la ressource en eau. Ils montrent que la prise en compte de la coopération entre les agriculteurs permet de mieux expliquer le comportement d'adoption. L'acquisition d'informations et d'expériences réduit l'incertitude et permet aux agriculteurs de percevoir de manière plus objective l'innovation et les risques encourus.

2-5- CONCLUSION PARTIELLE

Les agriculteurs du Sud Bénin perçoivent clairement la dégradation des sols, la baisse de la fertilité des sols, l'érosion des sols et leurs causes. Ils ont une bonne compréhension des problèmes de la dégradation des sols. Ces agriculteurs expliquent la dégradation des sols par deux principaux phénomènes: la baisse de la fertilité des sols et la perte de terre. La baisse de la fertilité du sol est principalement causée selon les agriculteurs par la déforestation, les feux de brousse, la culture continue, le type de sol et le piétinement animal. La perte de terre est principalement causée par la pente, le ruissellement, l'intensité de la pluie et de la durée. Plusieurs caractéristiques sociodémographiques influencent considérablement les perceptions des agriculteurs telles que le sexe, l'alphabétisation, l'encadrement technique et / ou l'appartenance à une organisation paysanne. La perception des agriculteurs varient significativement d'un bassin versant à un autre avec leurs déterminants sociodémographiques.

Plusieurs pratiques culturales caractérisent les systèmes de culture des agriculteurs sur les bassins versants. On y trouve des pratiques dégradantes du sol telles que le défrichement avec brûlis, le billonnage parallèle à la pente, le labour à plat, la fertilisation par les engrais minéraux, la culture continue, la monoculture et la lutte chimique contre les organismes nuisibles des cultures. Cependant, quelques pratiques de conservation du sol ont été adoptées par certains agriculteurs telles que le défrichement sans brûlis, l'incorporation des résidus de récolte par le labour, le semis direct, le labour minimum, le billonnage en courbe de niveau, la fertilisation organique, le mulching, l'assolement-rotation et la lutte préventive contre les organismes nuisibles des cultures.

Ces pratiques culturales varient significativement au seuil de 1% d'un bassin versant à un autre. Plusieurs facteurs sociodémographiques (l'âge, l'éducation, l'encadrement, etc.) influencent significativement l'adoption des pratiques culturales par les agriculteurs.

CHAPITRE 3

ETAT DE LA DEGRADATION DU SOL

Dans ce chapitre, un article a été publié et un autre en cours de rédaction (pré-article en annexe).

Kouelo A. F., Houngnandan P., Azontondé H. A., Benmansour M., Rabesiranana N., Mabit L. (2015). Assessment of the level of soil degradation in three watersheds affected by intensive farming practices in Benin. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 3(6): 529-540. DOI: <http://dx.doi.org/10.18006/2015>.

3-1- ETAT DE LA DEGRADATION DES SOLS A TRAVERS LEURS CARACTERISTIQUES

3-1-1- Contexte

La dégradation des sols est un problème mondial important en raison de son impact négatif sur la production agricole, la sécurité alimentaire et l'environnement. Une mauvaise gestion des terres, en particulier dans les zones à forte densité de population et des écosystèmes fragiles, augmente encore la perte de productivité des ressources des agriculteurs. Cela affecte leur sécurité alimentaire et leur niveau de vie (FAO, 2003). La dégradation de l'environnement est un problème majeur auquel de nombreux pays sont confrontés, mais les mécanismes impliqués dans cette dégradation varient d'un pays à l'autre. Dans les pays développés, l'utilisation de certaines technologies et la consommation excessive laissent derrière eux un volume de déchets difficile à recycler. Ce phénomène se manifeste dans le Sud par la surexploitation des ressources en bois et l'érosion des terres qui, chaque année, a conduit à l'abandon de sept millions d'hectares et la disparition de dix millions d'hectares de forêts tropicales (Joseph, 2003; Amy, 2008).

En Afrique sub-saharienne, la production agricole est soumise à de nombreuses incertitudes et contraintes. Le niveau de la productivité est généralement faible (matière organique inférieure à 2% de teneur en azote). La croissance démographique est également le principal facteur de contraintes pour l'agriculture des zones de savane. La raréfaction des terres agricoles dans de nombreux cas, conduit à l'abandon de la jachère à long terme (Dugué, 1998). La forte densité de la population dans la région a entraîné une pression sur les terres. Les terres appartenant à chaque ménage sont en baisse de superficie (2 à 0,5 ha) en raison de leurs divisions à l'héritage. Les agriculteurs sont contraints d'exploiter leurs terres, l'utilisation de la jachère devient rare et difficile. Les pays d'Afrique sub-saharienne sont parmi ceux qui ont le taux d'épuisement en éléments nutritifs de leur sol le plus élevé (Stoorvogel et Smaling 1990; Smaling 1993; Smaling et al, 1997). Selon le Centre international pour la fertilité des sols et le développement agricole (IFDC), l'Afrique perd chaque année 8 millions de tonnes de nutriments du sol et

plus de 95 millions d'hectares de terres ont été dégradées au point de réduire de manière significative la productivité (Henaou et Baanante, 2006). La dégradation de l'environnement évolue avec les conditions bioclimatiques et l'action humaine. Cette dégradation du sol est particulièrement préoccupante. Acteurs et chercheurs du développement ne peuvent donc pas rester indifférents à ce problème.

La dégradation des sols est un problème considérable au Bénin, en raison de fortes intensités de précipitations et des systèmes de production à faibles intrants répandus. La dégradation des sols est aggravante due à une expansion rapide des terres cultivées résultant de la croissance de la population, y compris la migration, le manque d'activités de conservation des sols et de la variabilité accrue des précipitations dues au changement climatique (Hiepe, 2008). En raison de tant de problèmes, la restauration de l'environnement est un défi majeur où l'échange et la transmission de l'information doivent être de meilleurs moyens pour encourager et soutenir l'action positive. Ainsi, une étude diagnostique de l'état de dégradation des sols dans trois bassins versants du sud Bénin a été entreprise et permettra de faire des propositions pour leur restauration. Cette étude vise à évaluer l'impact des pratiques culturales sur la dégradation des sols. Le site d'étude est un sol cultivé, donc sous l'effet des pratiques culturales, et le site de référence est le sol non cultivé, donc sans aucune influence de pratiques culturales. La comparaison de l'état de leur dégradation physique, chimique et biologique, va nous permettre d'atteindre les objectifs de cette étude.

3-1-2- Méthodologie

3-1-2-1- Sites d'études

Suite à la croissance démographique galopante, la pression foncière a entraîné la culture continue (suppression de la jachère) et la mise en culture des terres marginales telles que les terres en pente, les bassins versants. Les bassins versants sont très sensibles à la dégradation du sol car exposés à l'érosion hydrique. Les agriculteurs installés sur ces terres marginales, n'ayant que la terre pour subvenir à leurs besoins, doivent adopter des pratiques de conservation du sol pour la durabilité et la rentabilité de leurs activités agricoles. Ainsi, cette étude a été orientée vers les bassins versants dans les villages d'enquête (Govié, Lokogba et Linsinlin) sélectionnés au sud Bénin.

Le bassin versant du village de Govié alimente un marécage qui s'étend de Tori à Pahou (Figure 15). Le bassin versant de Lokogba alimente le fleuve Mono (Figure 16) et le bassin versant de Linsinlin alimente le fleuve Zou à travers son affluent Agbo (Figure 17).

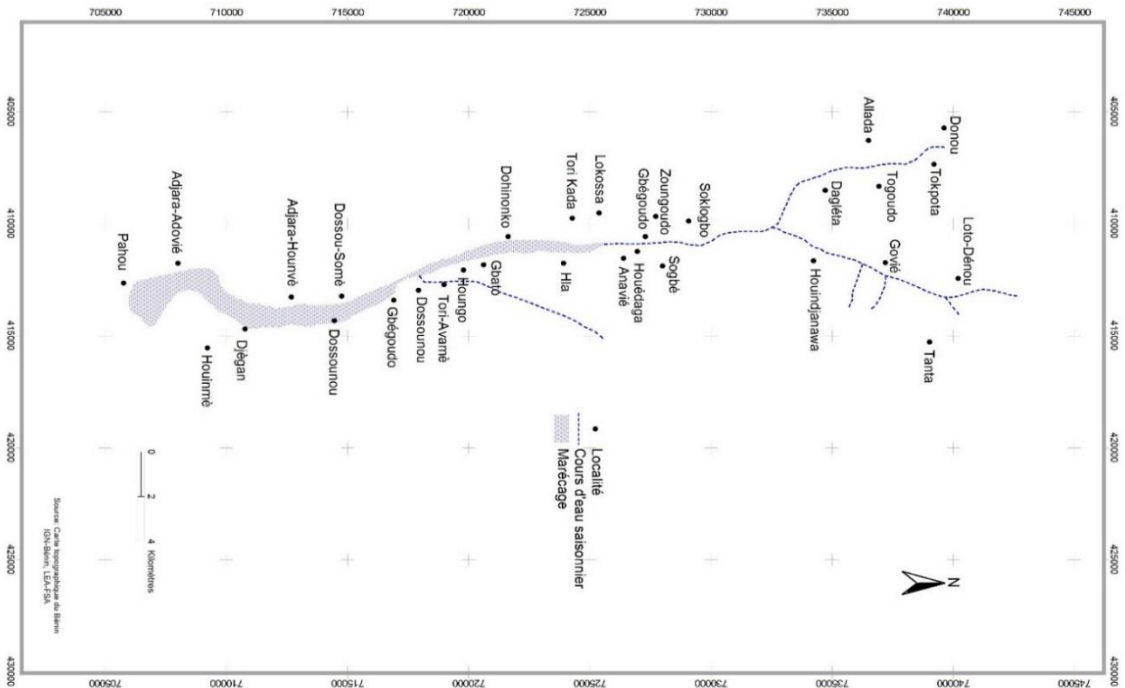


Figure 15: Réseau hydrographique du bassin versant de Govié

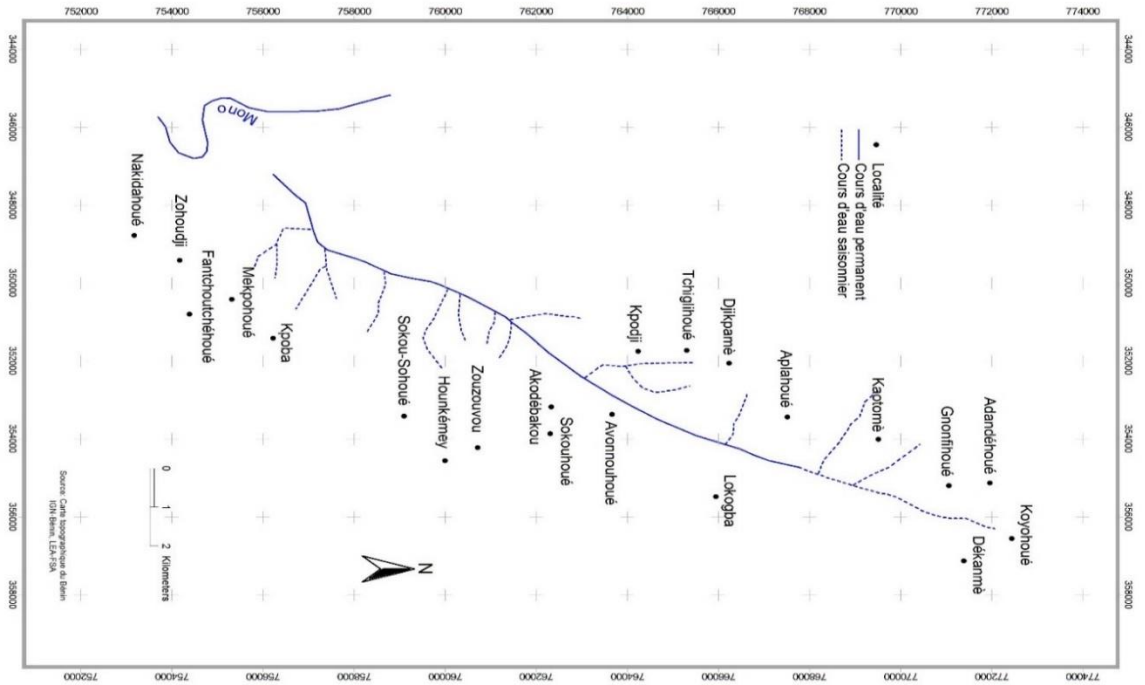


Figure 16: Réseau hydrographique du bassin versant de Lokogba

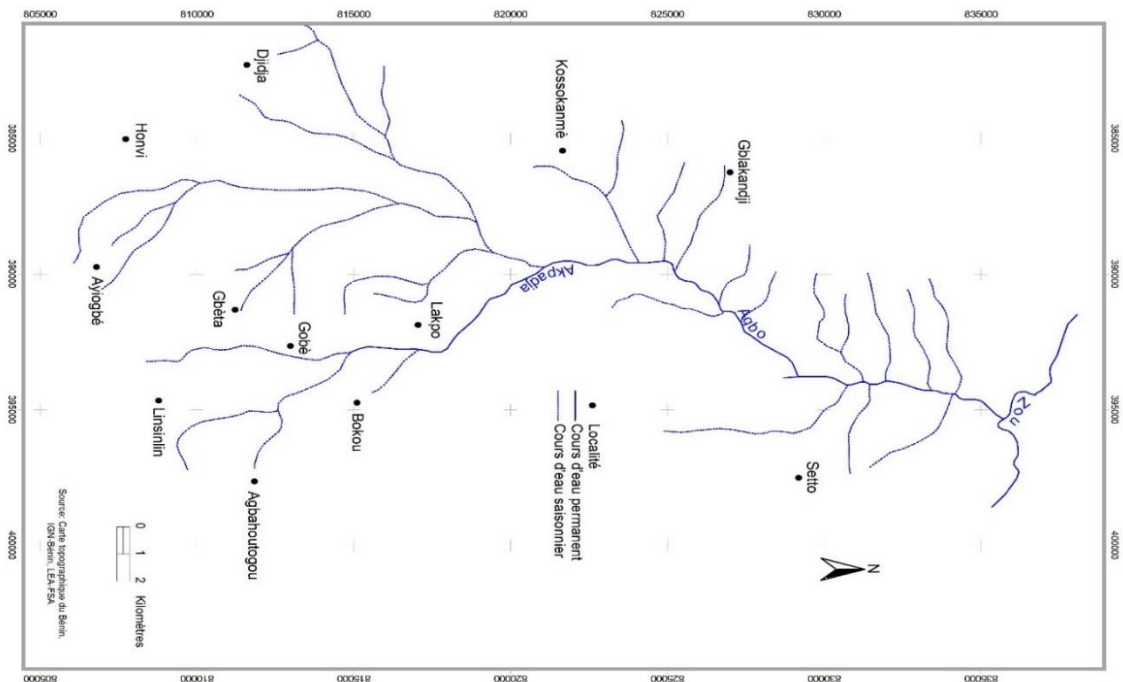


Figure 17: Réseau hydrographique du bassin versant de Linsinlin

Pour étudier l'effet des pratiques culturelles sur la dégradation du sol, des sites de référence ont été choisis, à raison de un par village. Les critères de sélection des sites de référence sont :

- La proximité du site d'étude (bassin versant ;
- ❖ le même type de sol que le site d'étude ;
- ❖ une pente zéro (sol plat) ou très négligeable ;
- ❖ un sol non perturbé pendant plus de 50 ans (aucune activité humaine).

Ces critères ont permis la sélection de la forêt sacrée de la divinité Hêbiosso dans les villages de Govié (installée depuis 55 ans,) et de Lokogba (installée depuis 62 ans) et la sélection d'une forêt sacrée utilisée par les rois du Danhomè pour des cérémonies traditionnelles (installée depuis plusieurs siècles). Les chefs traditionnels, responsables de la sécurité et de la sauvegarde de ces forêts, nous ont aidés, après des cérémonies, à les utiliser dans le cadre de cette étude. Les figures 18, 19 et 20 nous montrent la localisation des sites de référence et les bassins versants étudiés.

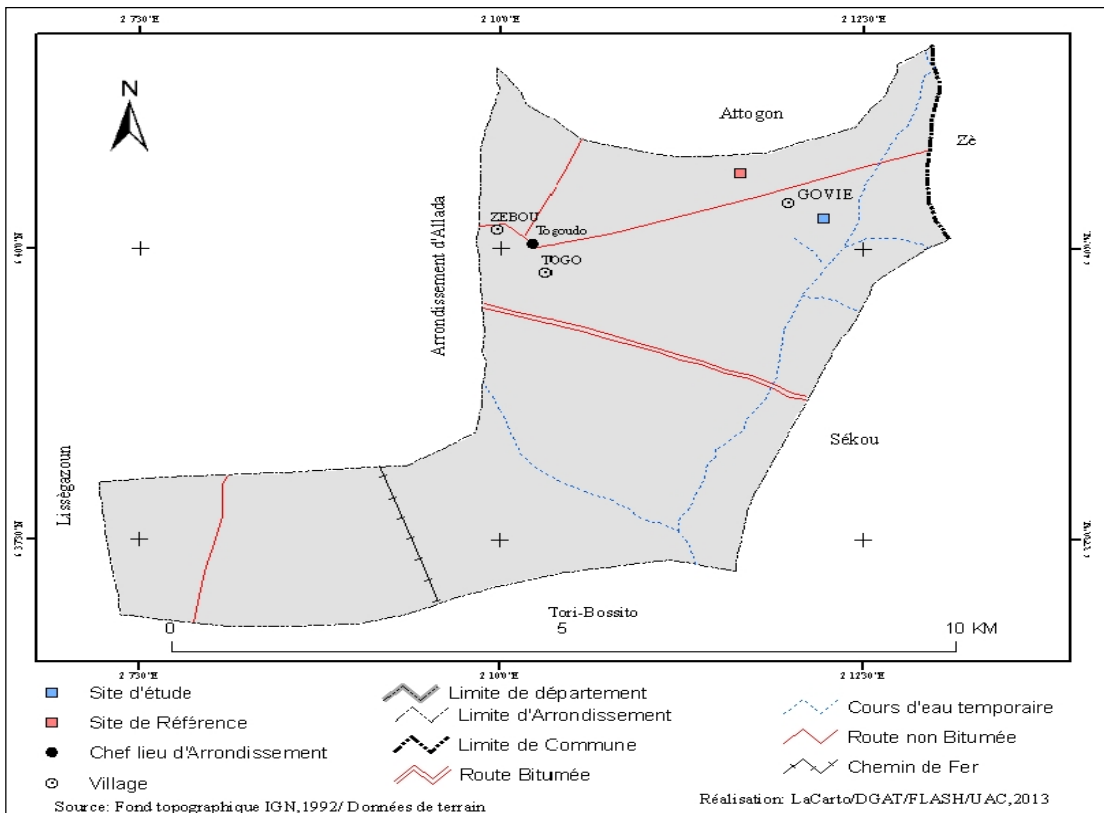


Figure 18: Carte de l'arrondissement de Togoudo montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Govié.

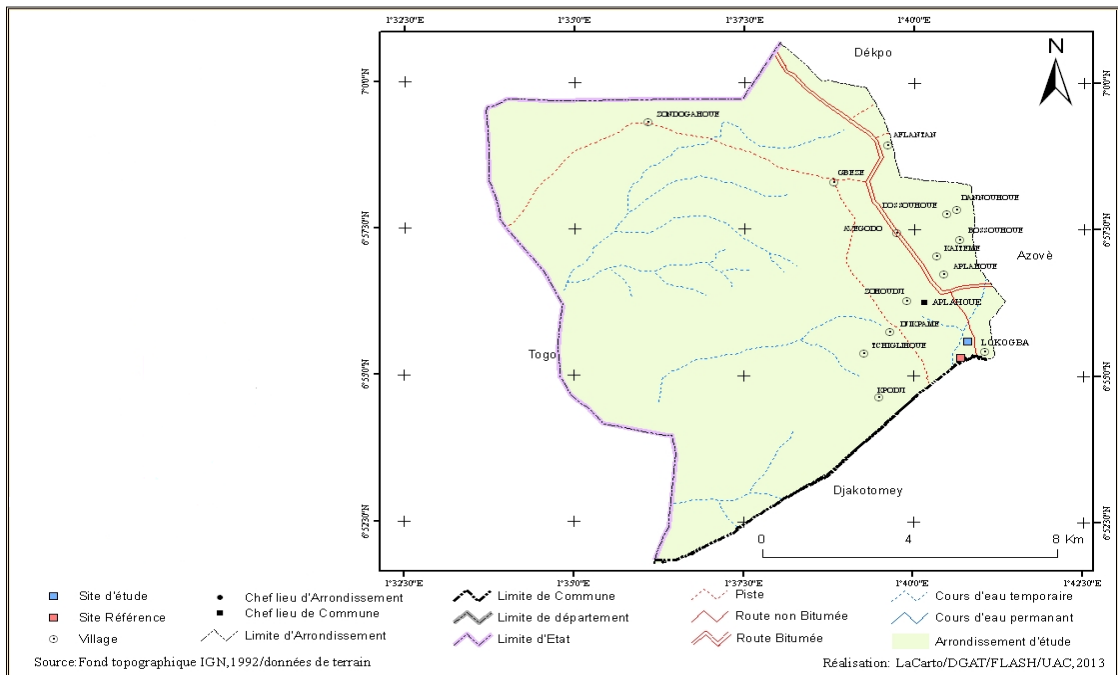


Figure 19: Carte de l'arrondissement d'Aplahoué montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Lokogba.

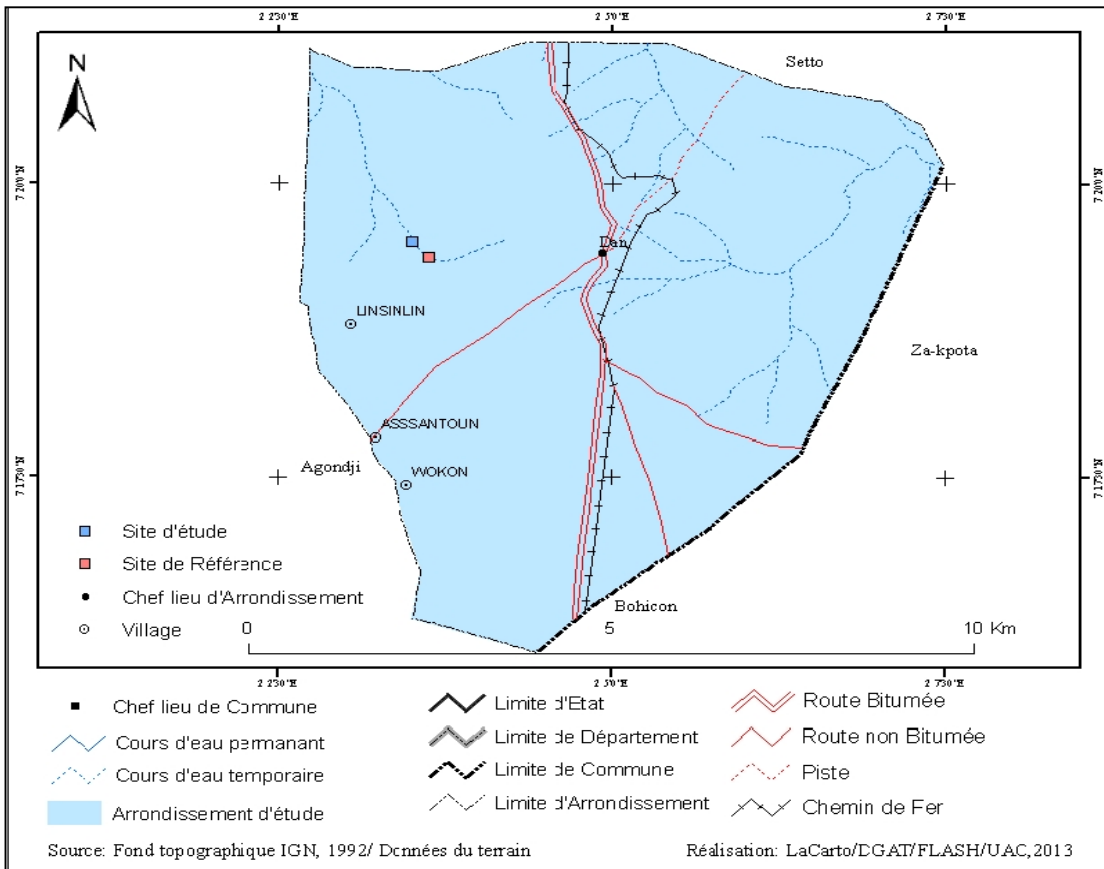


Figure 20: Carte de l'arrondissement de Dan montrant les sites de référence et d'étude du bassin versant de Linsinlin.

3-1-2-2- Méthodes de collecte des données

Les paramètres physiques, chimiques et biologiques sont les données collectées au cours de cette étude. En effet, deux transects parallèles à la pente et séparés de 10 mètres ont été choisis par bassin versant. Sur chaque transect, des échantillons de sol ont été prélevés tous les 15 mètres à l'aide d'un carotier cylindrique de 9 cm de diamètre sur une profondeur de 40 cm (Figure 21). Le nombre d'échantillons de sol par transect dépend de la longueur du transect et de la profondeur du sol.

Au niveau des sites de référence, 10 échantillons de sol ont été prélevés par site dans une grille carré de 2 m x 2 m avec le même carotier. Par transect et par site de référence, un échantillon de sol a été sectionné en 15 sous échantillons chacun à raison de 2 cm de section entre 0 – 20 cm et 4 cm de section entre 20 – 40 cm pour l'étude du profil (Figure 22).



Figure 21: Prélèvement d'échantillon du sol avec un carotier sur un transect



Figure 22: Section d'un échantillon du sol pour l'étude de profil

Les échantillons de sol prélevés sur les transects des sites d'études et sur les sites de référence ont été ramenés au laboratoire. Ils ont été séchés à l'air ambiant, tamisés, pesés et emballés. Leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques ont été déterminées par analyse de laboratoire :

➤ **Caractéristiques physiques du sol**

Densité apparente : Elle est le poids du sol sec par unité de volume. Sa valeur permet de déterminer la structure d'un sol c'est-à-dire le mode d'assemblage, à un moment donné, des constituants solides de ce sol. La mesure de la densité apparente se fait donc en prélevant une portion de sol non tassé grâce à un cylindre de densité calibrée de volume connu que l'on pèse après dessiccation à 105°C à l'étuve. La densité apparente D_a est calculée par le rapport du poids sec par le volume du cylindre.

$D_a = P/V$ avec P : poids du sol prélevé en g ; V (volume en cm^3) = $3,14 \times h \times r^2$; h = Profondeur de l'échantillonnage et r = rayon de la base du carotier.

➤ **Caractéristiques chimiques du sol**

pH (eau) et pH(KCl) : L'acidité du sol, tout comme la disponibilité de la majeure partie des éléments nutritifs dépend du pH (Baize, 1989). La mesure du pH a été effectuée par la méthode potentiométrique à l'aide, d'un pH-mètre électro mérique (Modèle Ohaus Starter 2100) étalonné avec trois solutions tampon à pH connu (pH 4, pH 7 et pH 10) à 20°C, dans une suspension de sol et d'eau distillée (pHeau) et solution normale de KCl (pHKCl), dans un rapport sol/solution de 2/5, après agitation pendant 1 h, suivie d'un repos de 18 h, selon la norme (NF X 31-117 1999).

Azote : L'azote total a été déterminé par la méthode de Kjeldahl qui consiste à la minéralisation de la matière organique du sol par l'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré en présence d'un catalyseur (sulfate de potassium + sulfate de cuivre + sélénium), l'ensemble chauffé à 330°C pendant 4 h puis laissé au refroidissement. On a procédé ensuite à la neutralisation par la soude (NaOH) et distillation de NH_3 et dosage par titrimétrie après ajout d'indicateur rouge de méthyl. Δv (ml) la différence entre le volume final et le volume initial ($\Delta v = V_f - V_i$) ; q_s le poids de l'aliquot du sol (mg) ; N (%) = $(\Delta v \times 1,4 \times 100) / q_s$ (Jones *et al.*, 1991).

Phosphore assimilable (Méthode Bray 1) : Il est extrait par la solution de Bray 1 (solution de fluorure d'ammonium et d'acide chlorhydrique à faible concentration). En présence de molybdate d'ammonium, l'acide phosphorique forme des complexes molybdiques. Ces complexes phospho-molybdiques sont formés par la coordination des ions molybdiques et du phosphore. Ce dernier étant l'atome central, l'oxygène du radical molybdate est alors substitué par celle du PO_4^{3-} . En milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, l'acide phosphorique forme des complexes molybdiques. Ces complexes phospho-molybdiques subissent l'action d'un réducteur, une solution d'acide ascorbique. Cette réduction s'accompagne d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la quantité de phospho-molybdate réduit, et en conséquence de phosphates présents dans le milieu (sol). Les complexes se transforment en bleu de molybdène. Utilisé à chaud (80°C), l'acide ascorbique présente l'avantage de donner une coloration stable. On mesure l'intensité du bleu de molybdène, et donc la concentration en acide phosphorique, par comparaison avec la coloration obtenue à l'aide de solutions témoins, au spectrophotomètre à la longueur d'onde 660 nanomètres (Bray et Kurtz,

1945). La concentration en phosphore assimilable est $P_{ass} \text{ (ppm)} = 0,326ky$ avec y = concentration en phosphore lue ; $k = (V_b \times V_l) / (q_s \times V_{ex})$; V_b = volume de la solution d'extraction de Bray 1 utilisé par échantillon; q_s = quantité de l'aliquote de sol ; V_l = volume d'extrait avec ajout de réactif préparé pour la lecture et V_{ex} = volume d'extrait utilisé.

Phosphore total (Méthode Duval): La méthode est semblable à celle du phosphore assimilable. La seule différence est le procédé d'extraction qui, ici, se fait par attaque du sol en milieu acide fort (acide sulfurique H_2SO_4 ; Duval, 1962).

Bases échangeables : Elles sont déterminées après extraction à l'acétate d'ammonium (1N, pH=7), puis dosage au spectromètre à absorption atomique (SAA). Les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} sont déterminés au spectromètre par absorption et les cations K^+ au spectromètre par émission (Fishman & Downs, 1966).

❖ *Caractéristiques biologiques*

Carbone organique / Matière organique : Il est déterminé par la méthode d'Anne modifiée. Cette méthode consiste à oxyder le carbone organique par du bichromate de potassium en milieu acide (acide sulfurique). Le bichromate étant en excès, la quantité réduite est proportionnelle à la teneur en carbone organique. On mesure alors l'intensité de la couleur provoquée par la présence des ions chromiques (Cr^{3+}) dans la solution par comparaison avec la coloration obtenue à l'aide de solutions témoins, au colorimètre ou au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 600 nanomètres (Okalebo et al., 2002). La matière organique est déduite du taux de carbone organique par la formule : $MO \text{ (}\%) = \text{carbone organique (}\%) \times 1,724$ avec MO = matière organique (Walkley et Black, 1934).

Biomasse racinaire : Les racines de plantes contenues dans les échantillons de sol ont été récupérées et pesées. Le pourcentage de biomasse racinaire (Br) du sol est calculée de la façon suivante : $Br \text{ (}\%) = Pr \times 100 / Ps$ avec Pr = poids des racines et Ps = Poids du sol.

3-1-2-3- *Analyse statistique des données*

Microsoft Excel 2013 a été utilisé pour faire des graphiques avec les résultats. Le test de conformité à une moyenne a été faite avec le logiciel SAS version 9.2 afin de comparer les caractéristiques physiques et chimiques du sol des transects de bassins versants à ceux du site de référence. Le test de comparaison de deux moyennes d'échantillons indépendants a été réalisé avec le même logiciel pour comparer les caractéristiques du sol des deux transects.

3-1-3- Résultats

3-1-3-1- *Profil du sol*

Bassin versant de Lokogba: Dans le site de référence, la densité du sol augmente de la surface ($0,73 \text{ g.cm}^{-3}$) vers la profondeur ($1,41 \text{ g.cm}^{-3}$) du sol. La biomasse racinaire est abondante dans les 30 premiers centimètres du sol. Sur le bassin versant, au niveau du transect 1, la densité du sol est constante tout au long du profil (Figure 22). Sous l'effet du

labour, le sol est compact. La biomasse racinaire est superficielle et occupe seulement les 4 premiers centimètres du sol (Figure 23). Au niveau du transect 2, la biomasse racinaire est abondante et la densité est à peu près constante sur les 12 premiers cm du sol.

Bassin versant de Linsinlin: Sur le site de référence, la densité du sol augmente de la surface vers la profondeur du sol (Figure 22). La biomasse racinaire est présente tout au long du profil du sol. Sur le bassin versant, au niveau du premier transect, la densité du sol augmente de la surface à la profondeur du sol. La biomasse racinaire est présente dans les premiers 10 centimètres et à partir de 25 cm de profondeur (Figure 23). Sur le transect 2, la densité du sol est constante tout au long du profil du sol. La biomasse des racines est présente entre 12 et 18 cm du sol.

Bassin versant de Govié: Les résultats du site de référence sont semblables à ceux des autres sites de référence. Sur les transects 1 et 2, la densité apparente du sol augmente de la surface vers la profondeur du sol (Figures 23 et 24). La biomasse racinaire est présente dans presque tout le profil du sol.

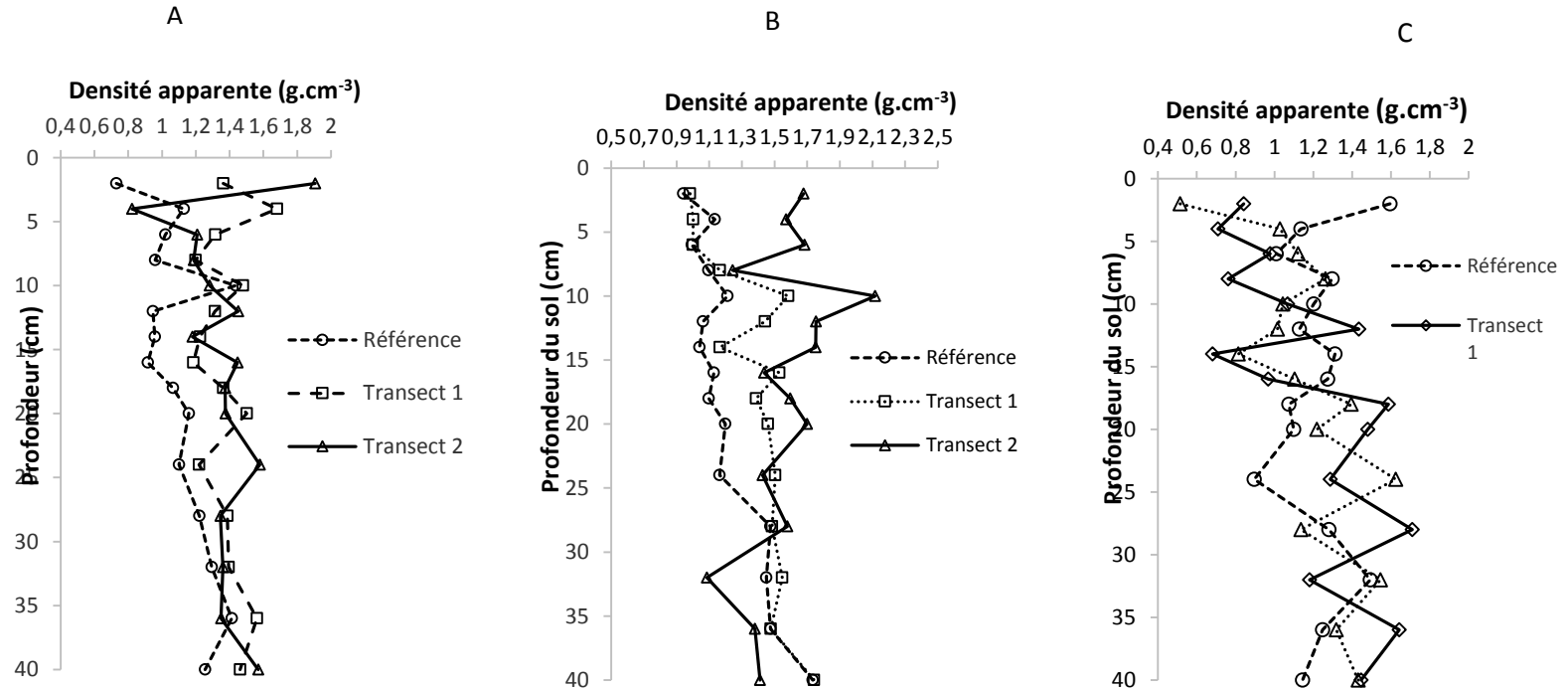


Figure 23: Effet des pratiques culturales sur la densité apparente du profil du sol sur le bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C).

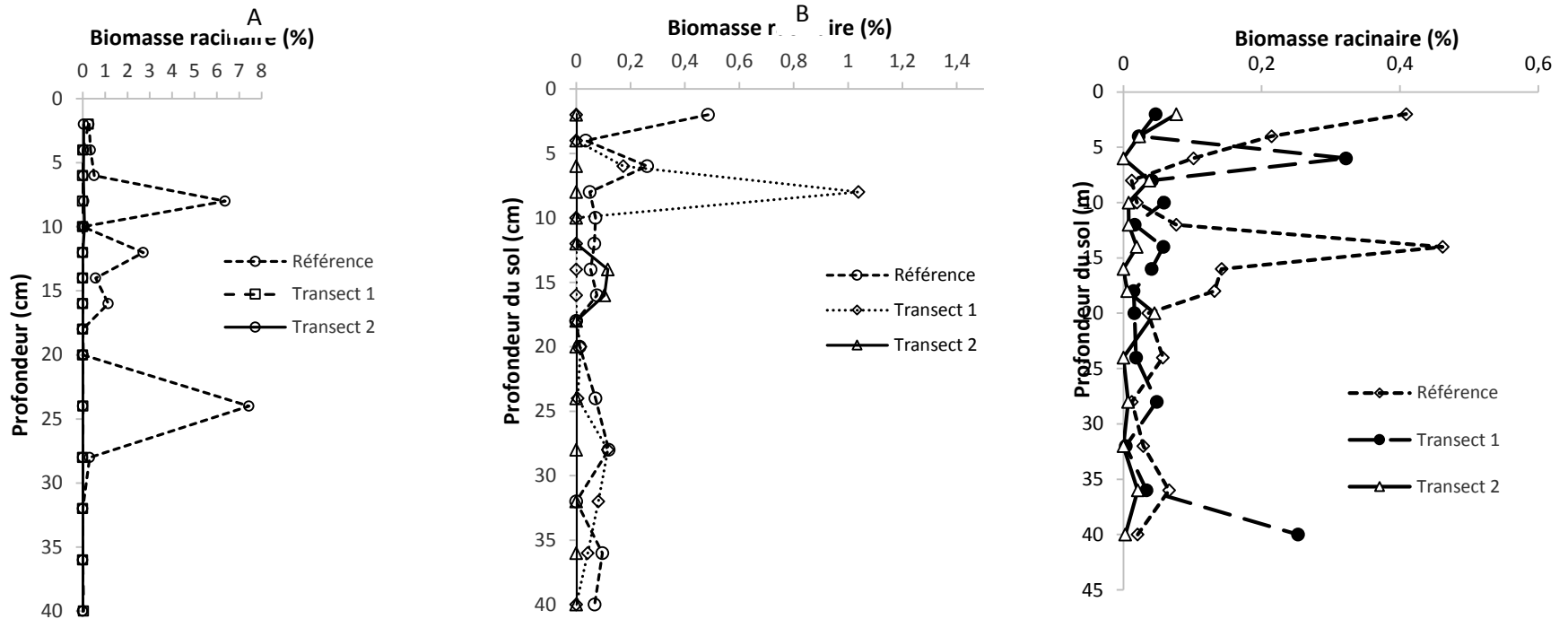


Figure 24 : Effet des pratiques culturales sur la biomasse racinaire du profil du sol sur le bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)

3-1-3-2- Densité apparente et biomasse racinaire du sol le long des transects.

Bassin versant du Lokogba: Tout au long des transects 1 et 2, la densité du sol est supérieure à celle du site de référence alors que la biomasse racinaire est très inférieure à celle du site de référence (Figures 25 et 26). Le sol du bassin versant est donc compact, moins poreux que le sol du site de référence. Ces résultats sont confirmés par la teneur en biomasse racinaire du sol qui est très faible le long des transects par rapport au site de référence. Il existe une différence très hautement significative entre la densité apparente du sol de transect 2 et celle du site de référence. Entre transect 1 et le site de référence, la différence n'est pas significative au seuil de 5%.

Bassin versant de Linsinlin: La densité du sol le long des transects est sensiblement égale à celle du site de référence. Mais la biomasse racinaire du sol le long de ces transects est inférieure à celle du site de référence (Figures 25 et 26). Nous pourrions dire que la biomasse racinaire diminue de manière significative en raison de la culture continue. Il n'y a pas de différence significative entre la densité apparente du sol des deux transects et celle du site de référence ($p = 0,757$). Les deux transects ont une densité apparente du sol et une teneur en biomasse racinaire semblables. Cependant, la biomasse racinaire du sol des deux transects est significativement différente de celle du site de référence ($p = 0,000$).

Bassin versant de Govié: La densité apparente du sol des transects est supérieure à celle du site de référence. La teneur en biomasse racinaire du sol est très faible le long des transects par rapport au site de référence (Figures 25 et 26). Il y avait une différence très hautement significative entre la biomasse racinaire des deux transects et celle du site de référence.

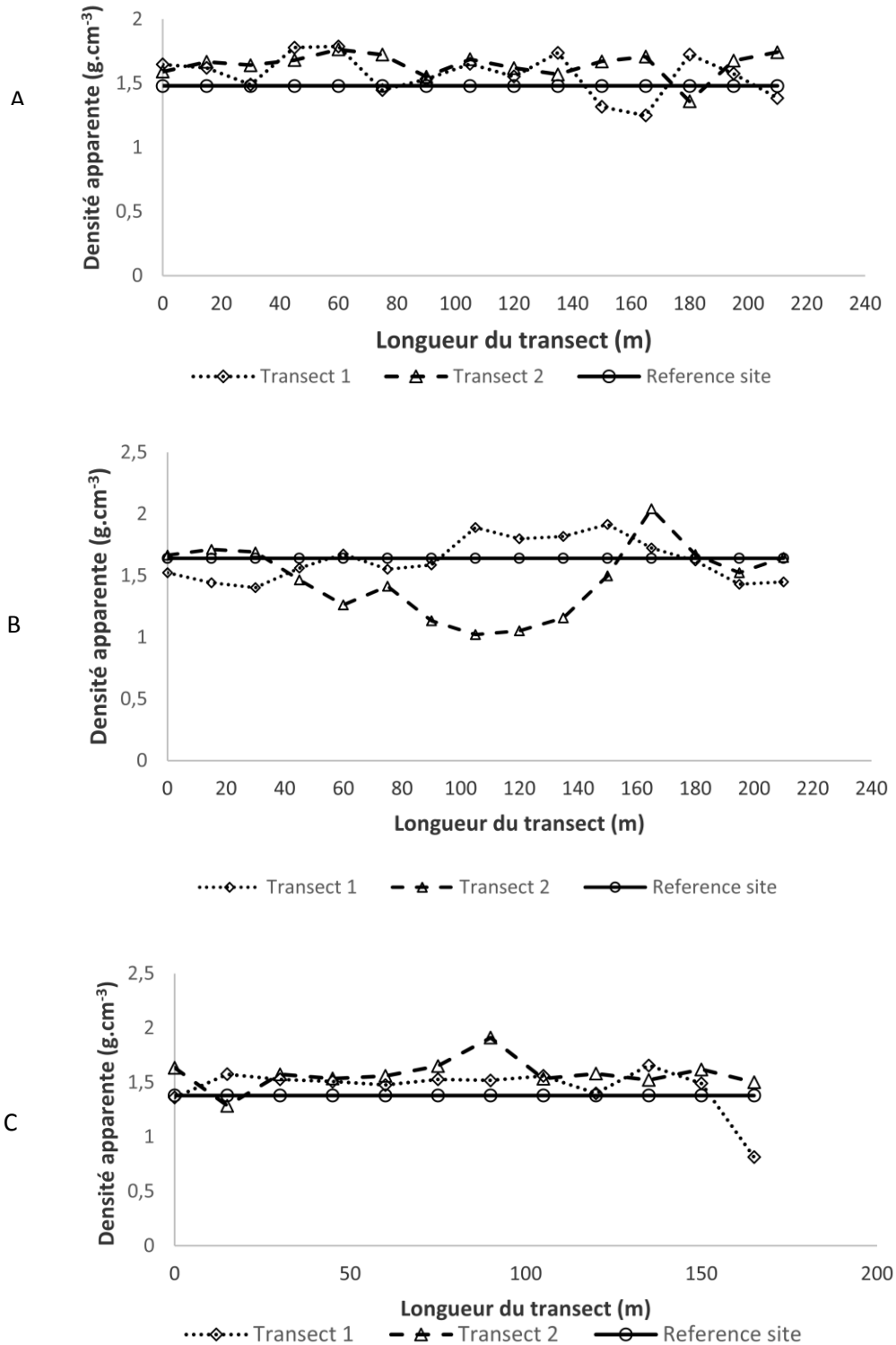


Figure 25 : Effet des pratiques culturales sur la densité apparente le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C).

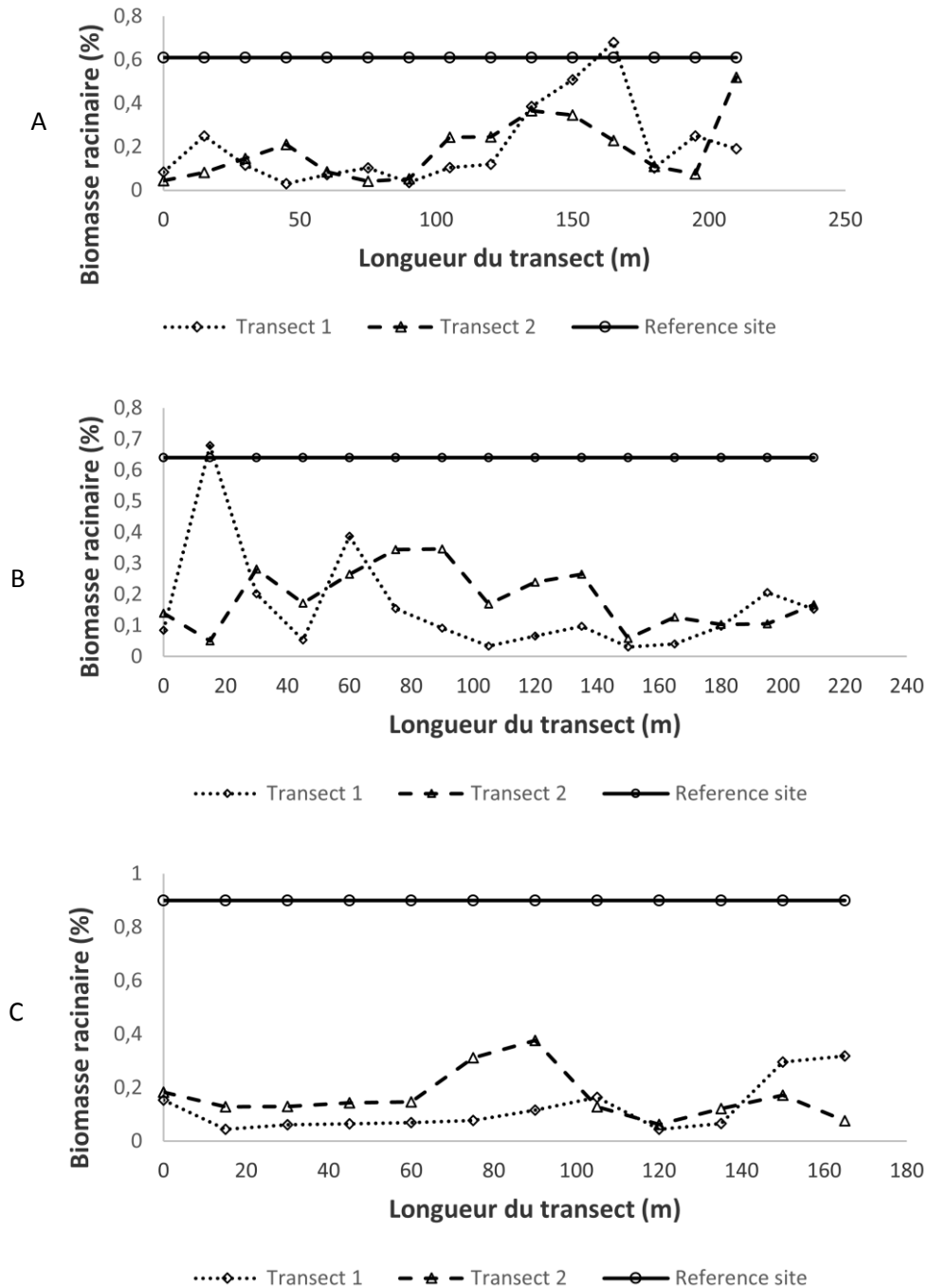


Figure 26 : Effet des pratiques culturales sur la biomasse racinaire le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba B) et de Linsinlin (C).

3-1-3-3- Propriétés chimiques et biologiques du sol

❖ L'acidité du sol

La réaction du sol du site de référence du village de Govié est neutre (pH = 6,6). Le sol du bassin versant est acide en général. Cette différence de l'acidité du sol est significative au seuil de 0,1% ($p < 0,0001$) aux deux transects. La différence entre l'acidité active et l'acidité échangeable montre que le sol du bassin versant a un potentiel d'acidification moyenne. Contrairement au bassin versant du village de Govié et de Linsinlin, le sol du site de référence et des bassins versants du village de Lokogba est faiblement acide. Cependant, le test-t de Student a montré une différence significative de l'acidité active du sol au seuil de 5% entre le site de référence et le bassin versant de Lokogba. Dans le village de Linsinlin, il n'y a pas de différence significative entre l'acidité du sol du site de référence et du bassin versant. Le potentiel d'acidification du sol dans le bassin versant de Lokogba est moyen, mais faible dans le village de Linsinlin (tableau 14, 15 et 16).

Tableau 14: Effet des pratiques culturelles sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Govié.

Points échantillonnés	Longueur du transect (m)	Acidité active		Acidité échangeable	
		Transect 1	Transect 2	Transect 1	Transect 2
P1	0	5,5	5,1	4,4	4,1
P2	15	5,2	5,1	4,3	4,5
P3	30	5,0	5,1	4,2	4,2
P4	45	5,1	5,4	4,3	4,7
P5	60	5,3	5,1	4,6	4,4
P6	75	5,2	4,9	4,2	4,1
P7	90	5,0	5,3	4,2	4,6
P8	105	7,1	5,4	4,9	5,0
P9	120	6,1	5,5	5,3	4,6
P10	135	6,0	5,3	5,3	4,5
P11	150	5,4	5,5	4,6	4,9
P12	165	5,0	5,3	4,2	4,6
Site de référence		6,6		6,4	
Bassin versant vs Site de référence	Valeur de T	-6,13	-24,84	-15,35	-21,95
	Probabilité	<0,0001***	<0,0001***	<0,0001***	<0,0001***

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%. ns = non significatif

Tableau 15: Effet des pratiques culturales sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Lokogba.

Point échantillonnés	Longueur du transect (m)	Acidité active		Acidité échangeable	
		Transect 1	Transect 2	Transect 1	Transect 2
P1	0	6,6	6,0	5,3	5,2
P2	15	6,1	6,0	5,5	5,2
P3	30	6,2	6,3	5,7	6,2
P4	45	6,2	6,1	5,5	5,6
P5	60	6,0	5,9	5,3	4,9
P6	75	6,1	6,2	5,6	5,5
P7	90	6,1	6,0	5,5	5,3
P8	105	6,1	6,3	5,4	5,9
P9	120	5,8	5,9	5,0	5,0
P10	135	5,8	6,0	5,1	5,5
P11	150	5,6	6,0	4,7	5,3
P12	165	6,3	5,9	5,8	5,1
P13	180	6,4	5,5	5,7	4,5
P14	195	6,2	5,7	5,4	4,8
P15	210	6,0	5,6	5,4	4,9
Site de référence		5,8		5,4	
Bassin versant vs Site de référence	Valeur de T	4,69	2,70	-0,09	-1,24
	Probabilité	<0,0001***	0,017**	0,930 (ns)	0,235 (ns)

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%. ns = non significatif

Tableau 16: Effet des pratiques culturales sur l'acidité du sol le long de deux transects du bassin versant de Linsinlin.

Points échantillonnés	Longueur du transect (m)	Acidité active		Acidité échangeable	
		Transect 1	Transect 2	Transect 1	Transect 2
P1	0	7,1	6,2	7,0	6,0
P2	15	6,6	5,8	6,4	5,4
P3	30	6,5	6,1	6,1	5,6
P4	45	6,3	6,0	5,6	5,9
P5	60	6,2	6,0	5,2	5,7
P6	75	6,2	6,0	6,0	5,8
P7	90	5,8	5,3	5,7	5,0
P8	105	5,5	5,1	5,3	5,0
P9	120	4,9	5,2	4,8	5,1
P10	135	5,0	6,1	4,9	6,0
P11	150	5,6	6,4	5,5	6,0
P12	165	6,1	6,4	5,2	6,1
P13	180	5,9	5,3	5,7	5,1
P14	195	7,4	5,1	7,0	4,8
P15	210	6,3	5,4	6,3	5,3
Site de référence		6,0		5,7	
Bassin versant vs Site de référence	Valeur de T	0,53	-1,96	0,45	-1,57
	Probabilité	0,607 (ns)	0,070 (ns)	0,657 (ns)	0,139 (ns)

*, **, *** sont respectivement les niveaux de signification de 10%, 5% et 1%. ns = non significatif

❖ La teneur du sol en azote

Les sites de référence des trois bassins versants sont riches en azote car leur teneur varie entre 0,15 et 0,25% selon les normes d'interprétation (Calvet et Villemin, 1986). Le sol du bassin versant de Govié est riche en azote et plus que le sol du site de référence. Cette différence entre la teneur en azote du sol du site de référence et du bassin versant est significative au seuil de 0,1% ($p < 0,0001$). Le sol des bassins versants de Lokogba et de Linsinlin n'est pas riche en azote contrairement au site de référence (Figure 27).

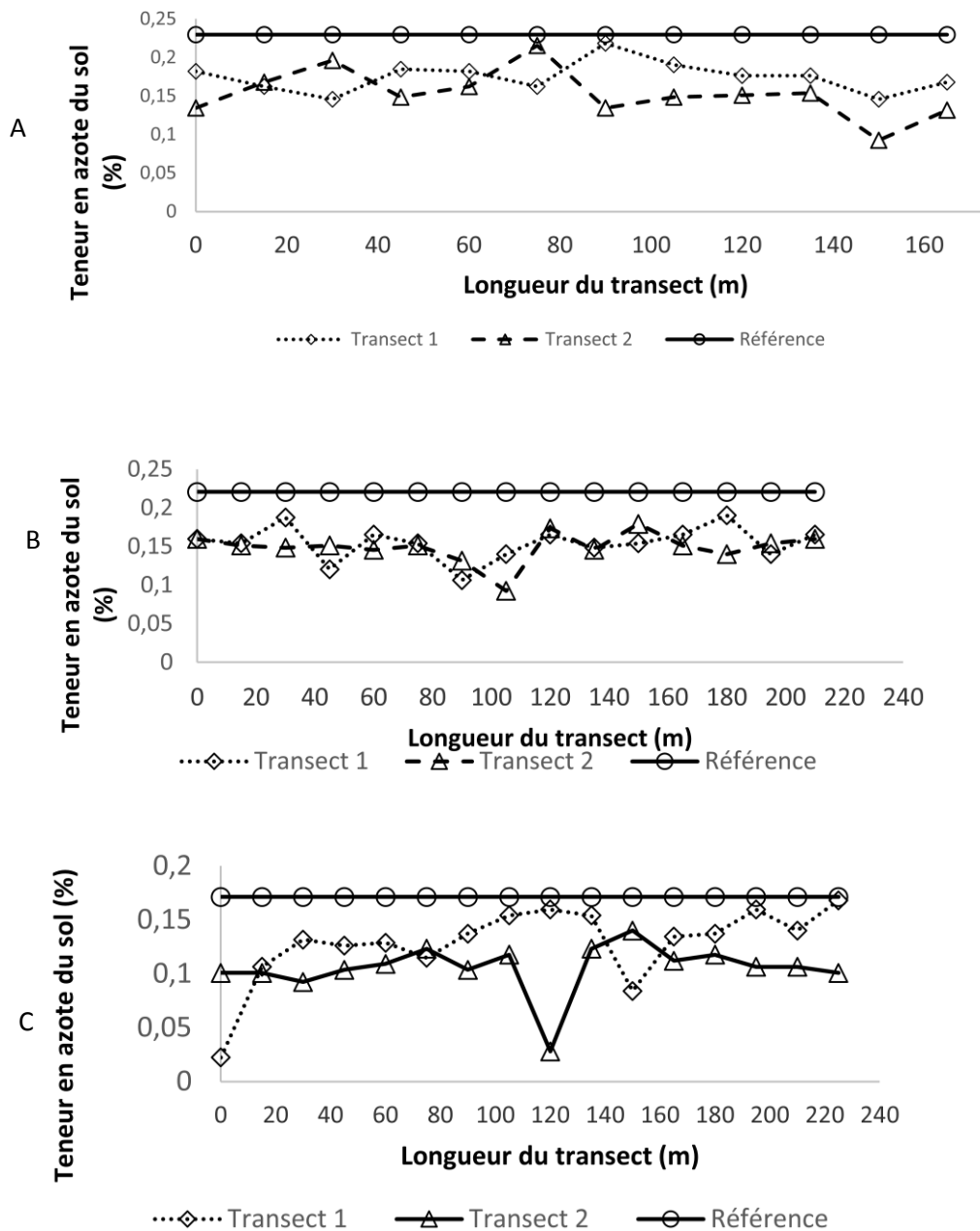


Figure 27 : Effet des pratiques culturales sur la teneur en azote du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C).

❖ La teneur du sol en phosphore

Le sol du bassin versant et du site de référence du village de Govié a une très faible disponibilité en phosphore ($P_2O_5 < 40$ ppm). L'analyse statistique n'a montré

aucune différence significative entre la teneur en phosphore assimilable du sol du bassin versant et celui du site de référence ($p = 0,8415$). La disponibilité du phosphore pour la culture est de 4,43% sur le site de référence alors qu'il varie de 4,38 à 4,56% sur le bassin versant. Sur le bassin versant de Lokogba, le sol du site de référence et du bassin versant est également très faible en phosphore assimilable (Figure 28). La teneur en phosphore assimilable est de 10,93 ppm sur le site de référence et varie 7,11 à 7,92 ppm sur le bassin versant. Il y a une différence significative au seuil de 0,1% entre la teneur en phosphore assimilable du site de référence et celle du bassin versant. La disponibilité du phosphore dans le sol du bassin versant de Lokogba ($P_{\text{ass}} / P_{\text{total}}$) est également très faible (10,56% sur le site de référence et 10,40 à 11,08% sur le bassin versant). Le sol du village de Lokogba a aussi un problème de la rétrogradation du phosphore, mais pas autant que le sol de Govié. Les résultats sont similaires au bassin versant de Linsinlin où la disponibilité du phosphore varie de 8,47% à 11,16% sur le bassin versant contre 8,79% sur le site de référence (Figure 27). Les trois sites sont très pauvres en phosphore assimilable. Le ratio Nt / Pt ($N_{\text{total}} / P_{\text{total}}$) est supérieure à 4 sur tous les sites et montre un déséquilibre de fourniture de phosphates et nitrates à la plante (Boyer, 1982).

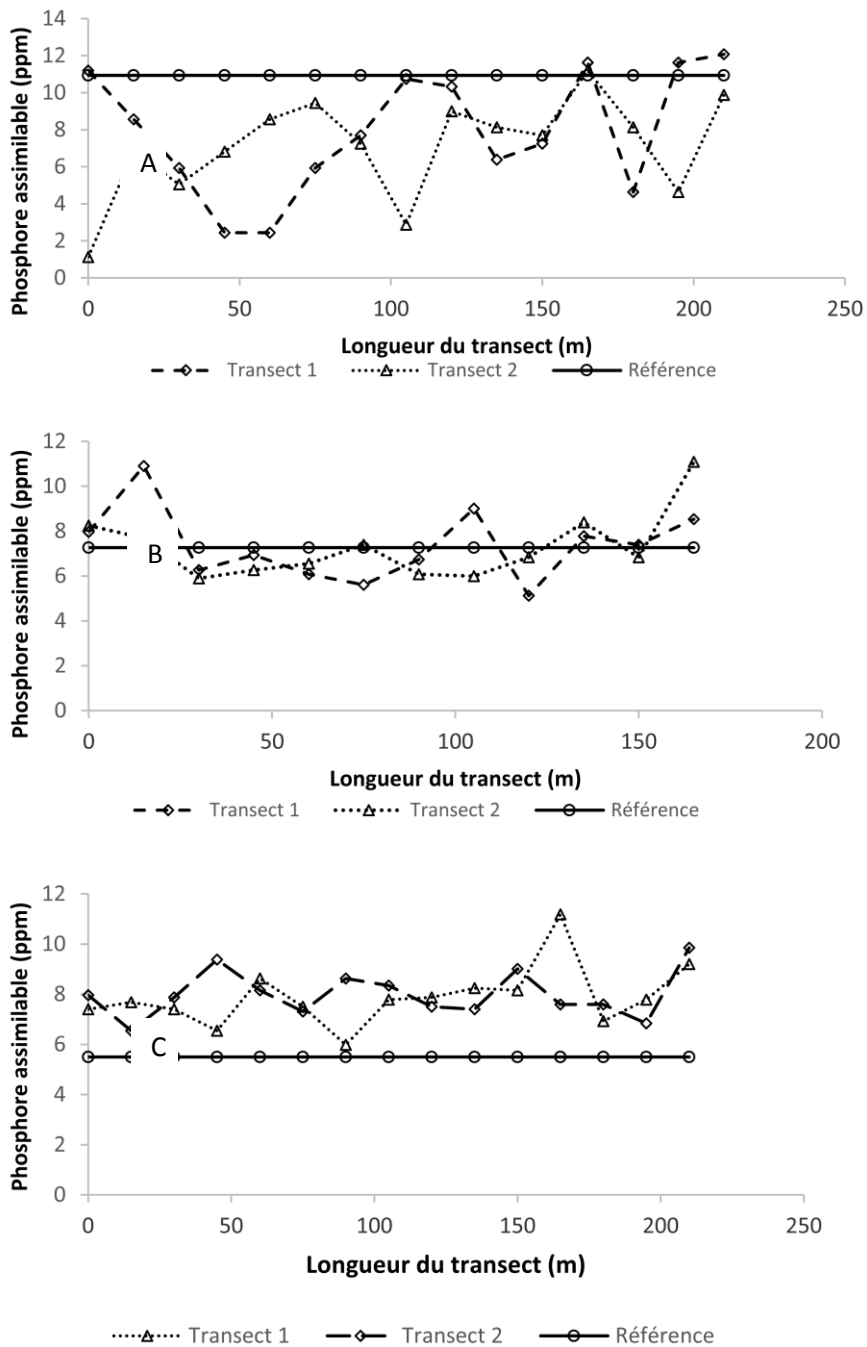


Figure 28 : Effet des pratiques culturales sur la teneur en phosphore assimilable du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)

❖ Matière organique du sol

Au niveau des sites de référence, la teneur du sol en matière organique est élevée sur les bassins versants de Lokogba et de Govié, mais faible à Linsinlin. La matière organique du sol est plus faible dans tous les bassins versants étudiés par rapport aux sites de référence. La différence de la teneur en matière organique du sol entre le site de référence et le site d'étude est significative au seuil de 0,1% à Govié et à Lokogba. A Linsinlin, la différence n'est pas significative. Les trois bassins versants ont de divers comportements à l'égard de la décomposition de la matière organique du sol. Par rapport au site de référence, la décomposition de la matière organique du sol est rapide dans Linsinlin ($C/N < 8$), normal dans Govié ($8 < C/N < 12$) et pauvre en Lokogba ($C/N > 12$). Sur les bassins versants, la décomposition de la matière organique du sol est rapide à Govié et à Lokogba, mais mauvaise sur le bassin versant de Linsinlin. Cette pauvre décomposition de matière organique du sol sur le bassin versant de Linsinlin est due à la présence de plusieurs points d'échantillonnage concaves sur un transect. Dans ces points concaves sont cumulées de fines particules du sol, des résidus végétaux et de l'eau, résultant de l'érosion de l'eau, la réduction de l'activité biologique du sol et de la matière organique conduisant à une faible humification (Figure 29).

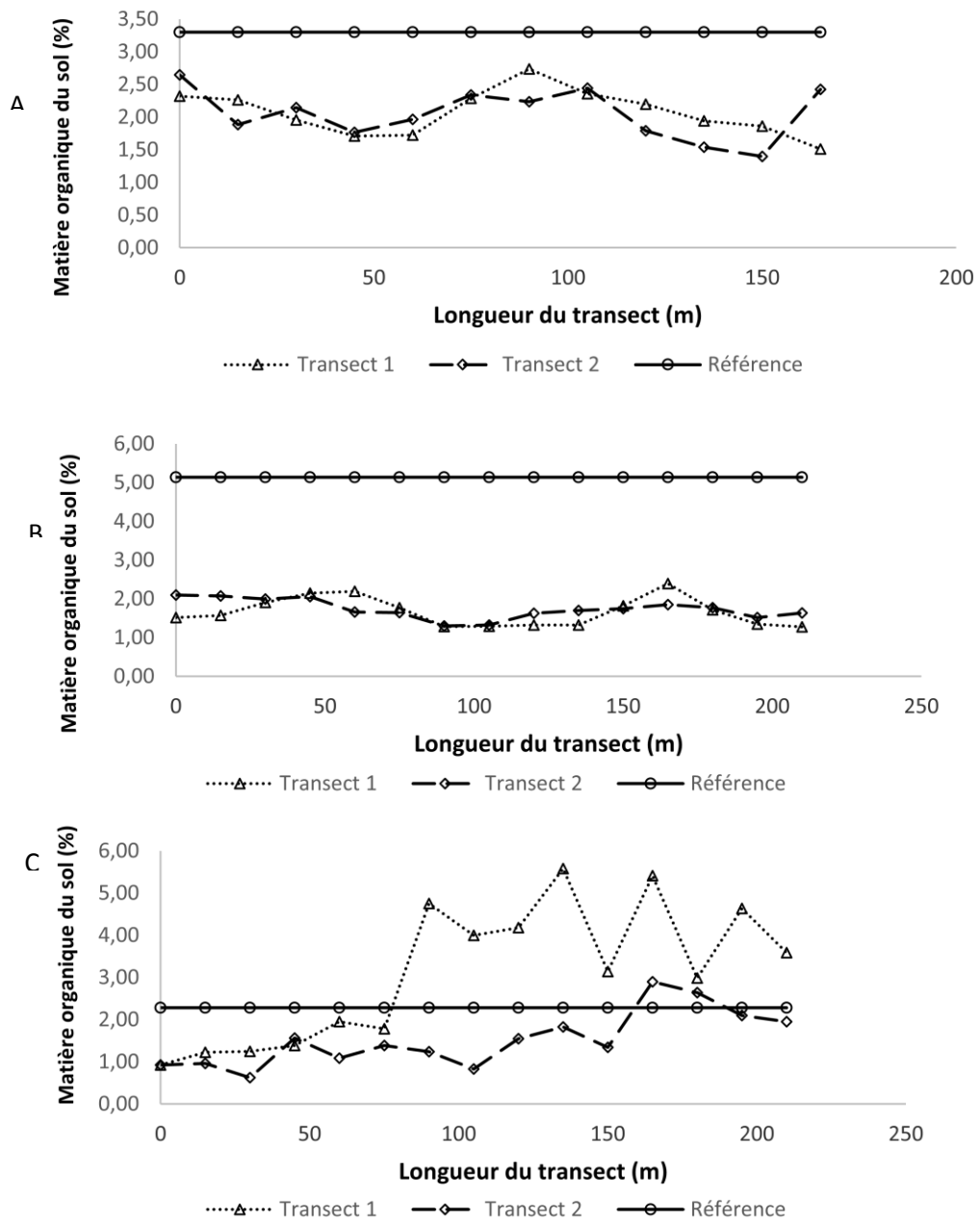


Figure 29 : Effet des pratiques culturales sur la teneur en matière organique du sol le long des transects du bassin versant de Govié (A), de Lokogba (B) et de Linsinlin (C)

3-1-4- Discussion

La densité apparente et la biomasse racinaire

La densité apparente est un indicateur de la compaction du sol. Il est utilisé pour exprimer des mesures physiques, chimiques et biologiques du sol sur une base volumétrique pour l'évaluation de la qualité des sols et la comparaison entre la gestion des systèmes de culture. La densité apparente élevée est un indicateur de faible porosité du sol et de compaction du sol (Arshad et *al.*, 1996). La compaction peut entraîner un enracinement peu profond et une faible croissance des plantes, influençant le rendement des cultures et la réduction de la couverture végétale disponible pour protéger les sols contre l'érosion. Les activités agricoles influencent significativement la densité apparente dans l'horizon A des sols cultivés (Brady et Weil, 2002). La valeur élevée de la densité apparente du bassin versant par rapport à celle des forêts (site de référence) traduit les effets des feux de végétation répétés et les mises à nu sans protection végétale après le déboisement et généralement en l'absence de tout apport de matières organiques sur cette occupation du sol (Boyer, 1982; Segalen, 1995).

Cela entraîne une érosion intense en raison des fortes pluviométries dans la zone intertropicale et les sols peuvent présenter rapidement un horizon compacté à faible profondeur, horizon qui limite l'enracinement des plantes et restreint de ce fait leur alimentation en eau et en éléments minéraux (Alongo et *al.*, 2013). De faibles valeurs de densité apparente sous la forêt dense (site de référence) sont dues aux processus d'humification et de décomposition de la matière organique ayant lieu préférentiellement dans les horizons supérieurs du sol ainsi que le développement racinaire (Boa, 1990; Harmand et Nutti, 1998).

L'acidité du sol

L'acidité du sol est une indication des éléments chimiques équivalents au niveau du sol en général. L'acidité du sol est en relation directe avec les cations et anions échangeables (Brady et Weil, 2008). L'acidification des sols est un processus naturel et est généralement accélérée par l'agriculture. Le taux d'acidification varie énormément selon le type de sol, l'utilisation des terres, la productivité et la gestion du système d'exploitation (Moore, 2001). L'acidification est aussi bien un phénomène naturel né de la pédogenèse dans les climats tropicaux les plus humides, qu'un phénomène provoqué par la mise en culture et la dégradation progressive, dans toutes les régions étudiées y compris à climat alterné (Dabin, 1985). Le défrichement et l'intensification de l'agriculture contribuent à l'acidification des sols. De nombreuses expériences ont été réalisées dans divers domaines, en particulier dans les climats alternatifs sur le sol ferrallitique. Ces expériences ont montré que le sol est graduellement épuisé de la forêt à la culture (Siban, 1972). Fauck en 1956 indique une diminution du pH de 0,15 à 0,20 unités par an en 6 ans de culture et après compensation, le pH est passé de faible (6,5) à fort (5,0). Il n'y a presque pas d'étude sur l'acidité du sol le long de transects des bassins versants.

Teneur du sol en azote, phosphore assimilable et en matière organique

La matière organique du sol, les nutriments et la structure du sol sont les principaux facteurs qui influent sur la fertilité des sols. Beaucoup de sols en Afrique sont fortement appauvris en éléments nutritifs et la teneur en matière organique du sol est très faible: inférieure à 1,0% voire 0,5% dans la couche supérieure du sol (Bot et Benites, 2005). Les raisons de la baisse de la matière organique du sol et étroitement liées à la teneur des éléments nutritifs sont tout simplement que le cycle de la biomasse et des éléments nutritifs ne se maintiennent pas, ce qui signifie plus de matériels sous forme de matière organiques et/ou de nutriments du sol (en particulier les macronutriments tels que l'azote, le phosphore et le potassium) quittent le système que ce qui est réapprovisionné. Ceci résulte de l'élimination de produits végétaux et résidus (biomasse végétale), la perte par l'érosion des sols, la lixiviation des éléments nutritifs (en dessous de la profondeur d'enracinement), la volatilisation des éléments nutritifs (azote par exemple) et la minéralisation accélérée de la matière organique du sol par le labour (FAO, 2011).

Les pertes d'azote vers d'autres compartiments de l'écosystème sont liées à son drainage vers les cours d'eau par les eaux de ruissellement et la lixiviation, l'absorption d'azote par les plantes, son organisation par la microflore, sa dénitrification biologique et sa volatilisation du sol (Kauark Leite, 1990). La faible teneur en matière organique, azote et en phosphore assimilable dans le sol des bassins versants par rapport au site de référence, est due aux activités agricoles et en particulier à l'érosion hydrique. L'érosion hydrique des sols n'est pas seulement la terre qui va dans la rivière. Elle emporte avec elle de nombreux autres nutriments. L'azote, très soluble dans l'eau, peut être trouvé facilement dans le ruissellement dans les cours d'eau ou les eaux souterraines par la lixiviation. Le phosphore principalement associé aux particules du sol se trouve dans les eaux de ruissellement vers la rivière (COGEBY, 2004). La matière organique, assez légère, est transportée par les eaux de ruissellement. Selon Dautrebande (2006), ajouter à la perte de terres des bassins hydrographiques associés au départ de nutriments (azote, phosphore) de matière organique, dissous dans l'eau de ruissellement ou adsorbé aux particules du sol eux-mêmes. La matière organique est transportée soit par le ruissellement de surface ou sous forme de particules individuelles ou adsorbée à des particules minérales du sol (TBE, 2005). Ces départs expliquent ainsi le déficit des sols du bassin versant en nutriments et en matière organique.

3-2- ETAT DE LA DEGRADATION DES SOLS A TRAVERS LES TECHNIQUES DE RETOMBES RADIONUCLEIDES

3-2-1- Contexte

Depuis plusieurs décennies, il est constaté au niveau mondial une baisse de la production agricole, principalement celle des céréales. Cette baisse est surtout attribuée à la dégradation accélérée des sols (Brown et *al.*, 1996). La dégradation des sols va de la pollution à la salinisation en passant par l'érosion issue des conditions topographiques, climatiques et anthropiques.

L'érosion hydrique constitue la forme la plus courante de ce processus de dégradation des sols. Il est établi que l'érosion des sols a des impacts environnementaux au-delà de l'appauvrissement du capital sol (Fox *et al.*, 2006). Dans les régions tropicales, l'érosion hydrique est l'un des phénomènes majeurs à l'origine de la dégradation des sols et de la baisse de productivité des terres cultivables (Roose, 1994).

Environ 3 millions d'hectares des terres arables disparaissent progressivement chaque année dans le monde. En Afrique, l'érosion affecte 72 % des terres arables, soit 10 fois le taux de formation naturelle du sol. Les terres perdues sont 2,5 fois plus riches en nutriments que la terre restante (Benmansour *et al.*, 2006). Ce processus de dégradation accélérée des sols constaté dans plusieurs régions dans le monde est également très présent au Bénin surtout dans les régions du Sud. Au Bénin, les quelques études consacrées à l'érosion (Azontondé, 1993 ; Avakoudjo *et al.*, 2013) sont très loin d'impacter ce problème. Aussi, dans la majorité des cas, ces études sur l'estimation de l'érosion des sols sont basées exclusivement sur des investigations de terrain. Cette approche est généralement longue, coûteuse. Elle doit être poursuivie pendant plusieurs années, afin d'intégrer les fluctuations climatiques interannuelles. Le nombre de parcelles requises peut également devenir très élevé, si l'on désire estimer le risque d'érosion sous une variété de conditions édaphiques et agronomiques. Aussi les parcelles de quelques dizaines de mètres carrés ne peuvent-elles pas suffire pour estimer l'intensité du phénomène.

Les radionucléides et les techniques isotopiques stables constituent une approche assez prometteuse pour étudier les problèmes d'érosion et de dégradation des sols. Les technologies nucléaires peuvent aussi aider les pays à évaluer et améliorer leurs pratiques de gestion de l'eau et des sols. La technique de retombées radionucléides pour évaluer l'érosion des sols a été maintenant appliquée sous différentes conditions climatiques, et la base de la technique est bien documentée. Toutefois, peu d'études ont été entreprises en dehors des régions tempérées du monde. Ces études ont été réalisées au Maroc, en Tunisie et au Madagascar. L'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), dans sa mission de promouvoir l'utilisation des radioéléments dans la recherche scientifique en Afrique, a mis en œuvre un projet de recherche coordonné dénommé RAF 5063 et intitulé : « Supporting Innovative Conservation Agriculture Practices to Combat Land Degradation and Enhance Soil Productivity for Improved Food Security ». Ce projet, dont l'objectif est de former et de renforcer la capacité du personnel des institutions de recherche africaines, a regroupé dix pays africains dont le Bénin. Ce projet nous a permis donc de réaliser les travaux de ce chapitre après nous avoir formés sur l'utilisation des techniques nucléaires dans l'étude de la conservation des sols.

La présente étude est donc une première application de cette technique au Bénin dans l'étude de la dégradation du sol. Deux radio-isotopes ont été utilisés dans cette étude : le Césium-137 (^{137}Cs) et l'excès du Plomb-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$). Ces radioéléments utilisés comme traceurs des mouvements de sol constituent un moyen intéressant et innovateur qui permet de rendre compte du déplacement des particules de sol et d'en estimer de façon

quantitative les taux de perte en sol sur de longues et courtes périodes (Zapata, 2002). En effet, le ^{137}Cs , radioélément artificiel introduit dans l'environnement suite aux essais nucléaires des années 1950-60, renseigne sur le mouvement du sol et donne le taux de l'érosion hydrique à différentes échelles scalaires sur 30 à 45 ans. Pour des épisodes d'érosion relativement plus longues environ 100 ans, le taux de perte de terre est déterminé à partir du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$, produit naturellement du radon atmosphérique (^{222}Rn). Apportés par les précipitations, ces radioéléments se fixent rapidement et fortement aux particules du sol inférieures à 2 mm (terre fine). Par la suite, l'érosion les redistribue spatialement avec les particules du sol. La technique nucléaire a été appliquée à trois bassins versants du sud du Bénin en vue d'évaluer l'état de dégradation du sol de ces derniers. L'utilisation de modèles d'interprétation tenant compte des retombées initiales permet de convertir en termes de perte ou de dépôt de sols l'activité en radio-isotope ainsi redistribuée (Figure 30).

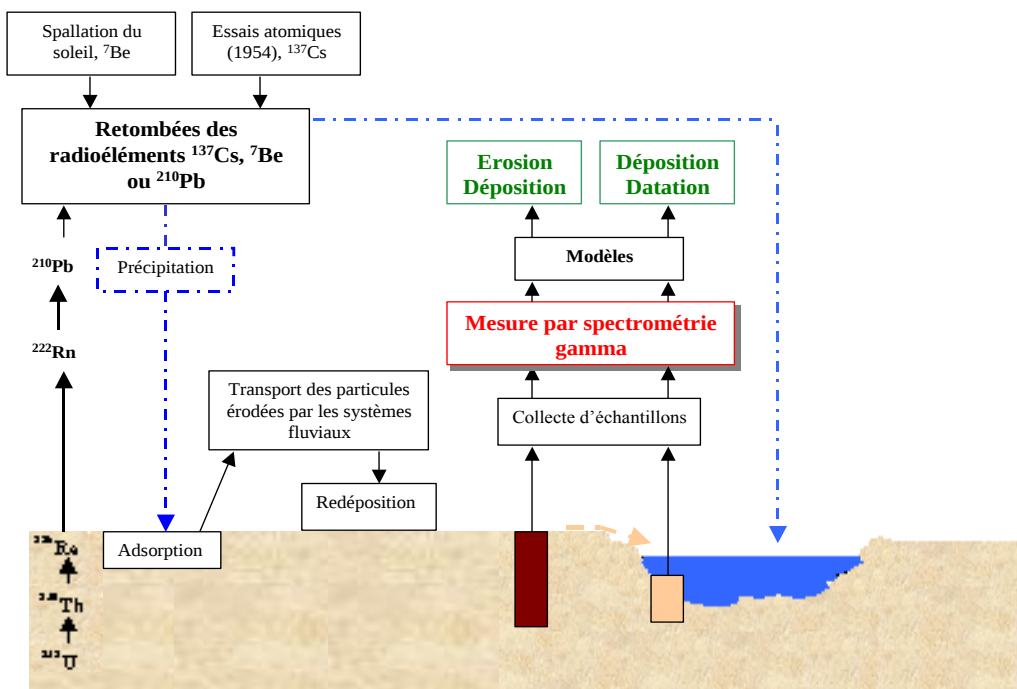


Figure 30: Le cycle des retombées des radioéléments étudiés

3-2-2- Méthodologie

Les coordonnées géographiques de tous les points de prélèvement d'échantillons de sol ont été collectées montrant le profil topographique des transects (Figures 31, 32, 33, 34, 35 et 36).

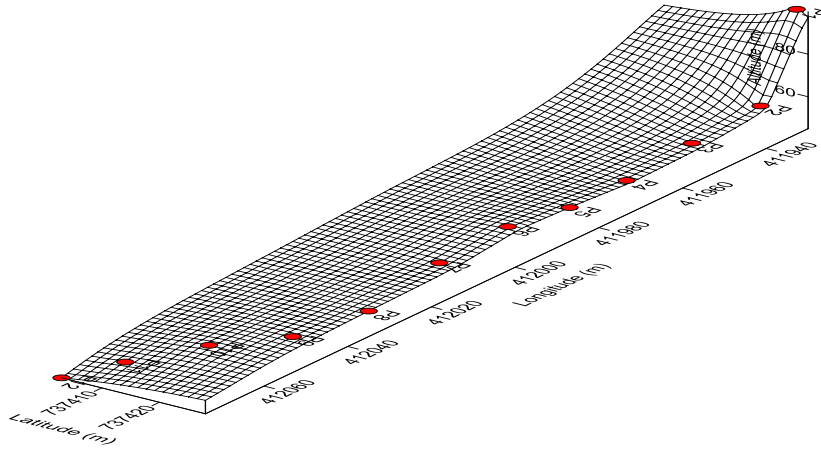


Figure 31: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Govié montrant les points d'échantillonnage.

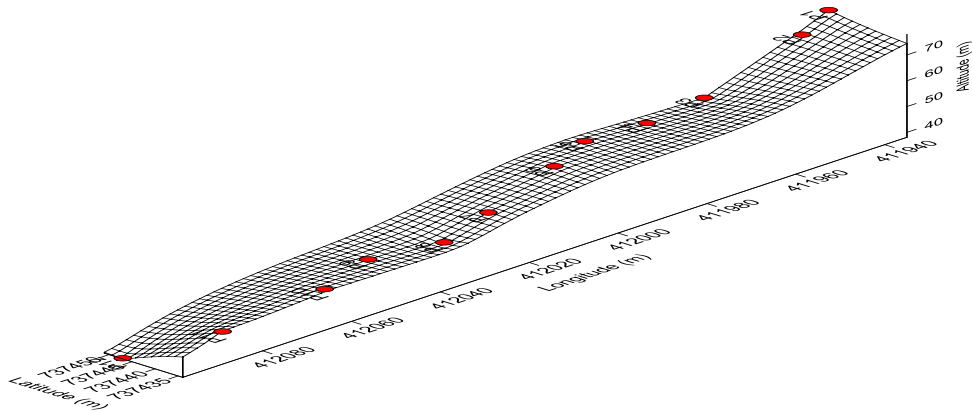


Figure 32: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Govié montrant les points d'échantillonnage.

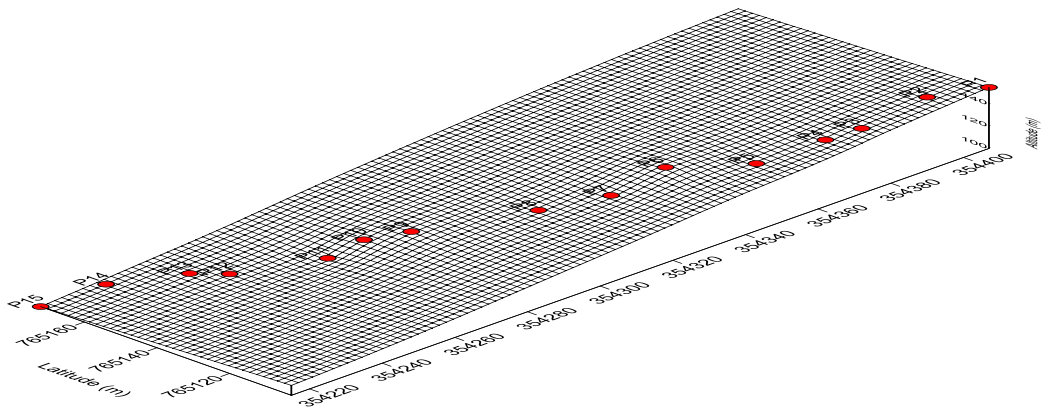


Figure 33: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Lokogba montrant les points d'échantillonnage.

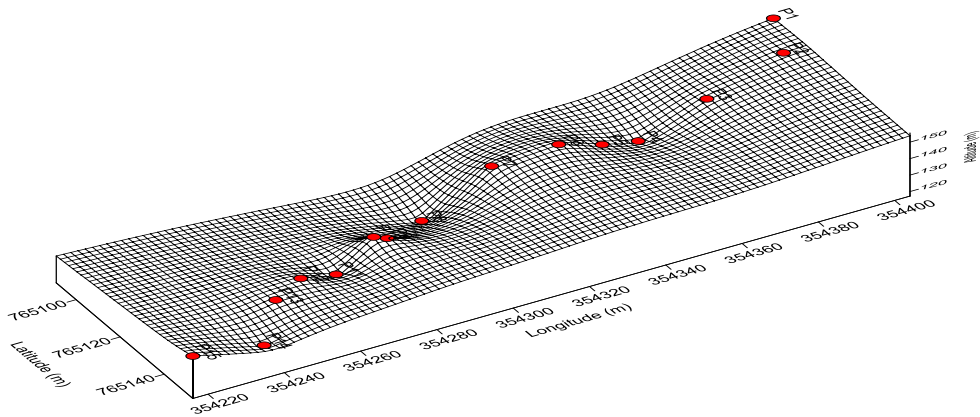


Figure 34: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Lokogba montrant les points d'échantillonnage.

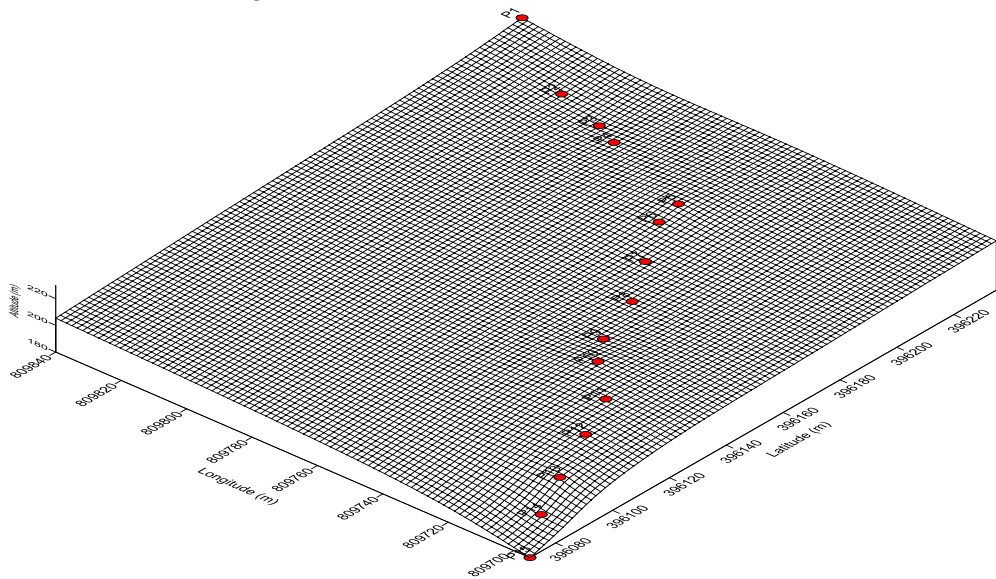


Figure 35: Profil topographique du transect 1 du bassin versant de Linsinlin montrant les points d'échantillonnage.

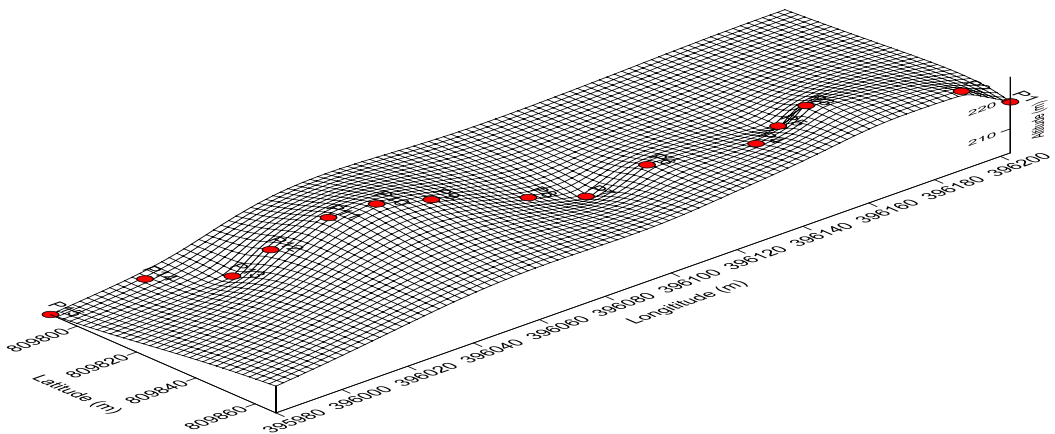


Figure 36: Profil topographique du transect 2 du bassin versant de Linsinlin montrant les points d'échantillonnage.

Les échantillons de sol prélevés sur les transects des sites d'études et sur les sites de référence ont été envoyés au Laboratoire du Centre National de l'Energie, des Sciences et Technologie Nucléaires (CNESTEN) à Rabat au Maroc. Ces échantillons ont été analysés et leur teneur en ^{137}Cs et en $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ ont été déterminées à partir du spectromètre Gamma. La spectrométrie gamma est une technique non destructive de mesure nucléaire utilisée pour identifier et quantifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie et du nombre de rayonnements gamma émis par la source. Le flux de photons gamma émis par la source interagit en déposant l'intégralité ou une partie de son énergie dans le cristal de détection. Cette mesure réalisée sur une certaine durée permet de construire un spectre : histogramme donnant le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie. L'identification est possible car les noyaux atomiques ont une structure en niveaux d'énergie de sorte qu'ils ne peuvent émettre ou absorber que des photons d'énergies particulières. Ces niveaux d'énergie ou raies d'émission sont caractéristiques de chaque radio-émetteur gamma. Les raies se matérialisent sous forme de pics dans le spectre (Figure 37).

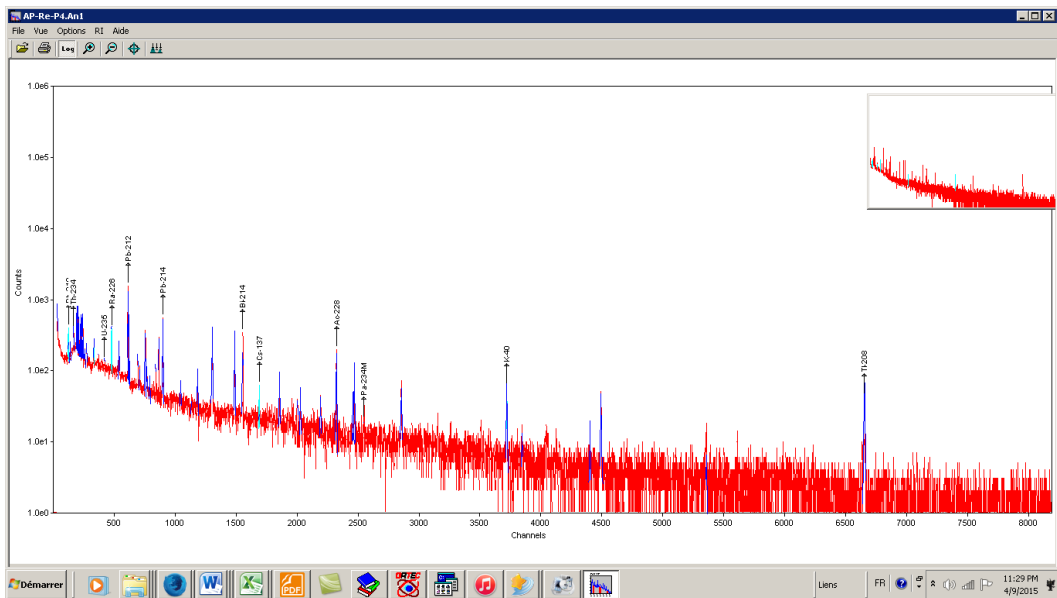


Figure 37: Spectre d'analyse d'échantillon par Spectrométrie gamma

La méthode d'analyse basée sur la spectrométrie gamma n'est valide que lorsque l'identité et la teneur des radioéléments auxquels sont dus les pics du spectre sont déterminées avec précision et exactitude, c'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une calibration précise en énergie et en efficacité de détection.

Les activités du ^{137}Cs , du ^{210}Pb et du ^{214}Bi (pour ^{226}Ra) ont été mesurées simultanément dans les échantillons du sol par spectrométrie gamma en utilisant deux détecteurs coaxiaux de type germanium hyper pure ('P'-type 30% et 'N'-type 50%) et à base énergie couplés respectivement à des amplificateurs multicanaux de type CANBERRA et ORTEC. Les échantillons sont conditionnés dans des flacons en plastique de forme cylindrique. La géométrie de 50 ml a été adoptée par tous les détecteurs.

L'efficacité du système de détection (Figure 38) a été calibrée en utilisant une source standard liquide (source multi gamma constituée d'un mélange de dix radioéléments ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{51}Cr , ^{113}Sn , ^{85}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{88}Y) et de deux matériels de référence (IAEA 327 et IAEA 375). Le facteur de correction de l'efficacité a été calculé pour corriger les efficacités de détection pour la matrice solide (échantillons de sol).

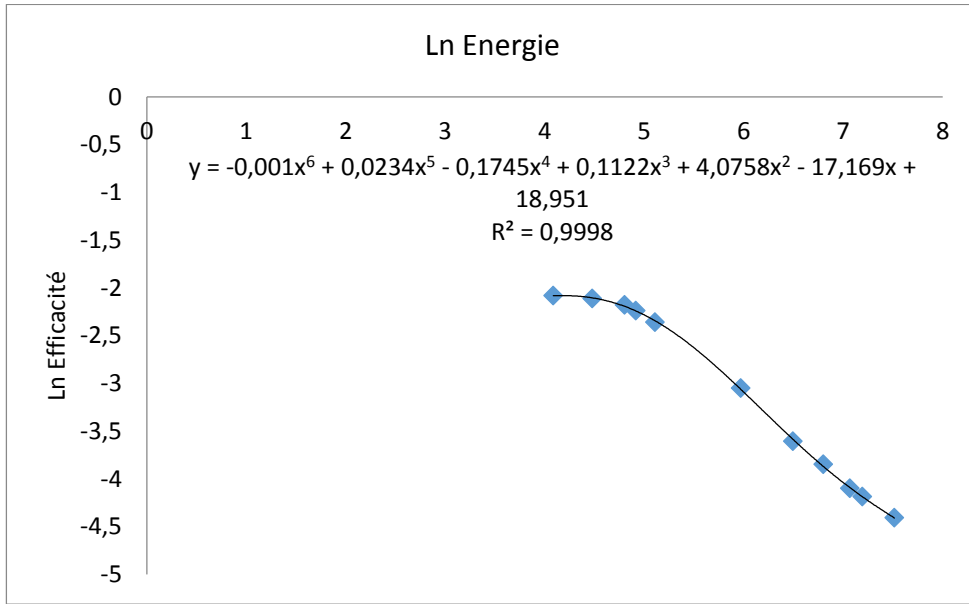


Figure 38: La calibration de l'efficacité du système de détection

Les portes échantillons ont été placés sur la tête du détecteur pendant 24 heures pour le comptage des radioéléments. Les spectres ont été enregistrés et dépouillés à l'aide du logiciel GammaVision pour le détecteur de 50 % et le logiciel Génie 2000 pour les détecteurs de 30 %.

Les activités de ^{137}Cs , ^{210}Pb et du ^{214}Bi ont été déterminées par la surface nette de leur pic gamma à 661,6 ; 46,5 et 609 keV respectivement. L'activité du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ a été calculée en soustrayant l'activité du ^{214}Bi de celle du ^{210}Pb . Le temps de comptage varie de 12h à 24h vu que les activités sont faibles dans les échantillons.

Les pertes de terre ont été estimées en utilisant le Modèle Mass Balance 2 (MBM2) de Walling et al. (2002). Ce modèle nous a permis de convertir les inventaires de ^{137}Cs et de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ en taux d'érosion ou de sédimentation selon l'équation suivante :

$$\frac{dA(t)}{dt} = (1 - \Gamma) I(t) - \left(\lambda + P \frac{R}{d} \right) A(t)$$

Γ : Pourcentage de Cs érodée avant incorporation à la couche du sol par labour

$I(t)$: flux de déposition annuel

Selon Walling et al. (2002) :

$$I(t) = I_n A_{\text{ref}} / A_n$$

$A(t)$: taux d'érosion annuel

En supposant qu'il y a une distribution exponentielle de la concentration du Cs dans le profil du sol,

$$\Gamma = P \gamma (1 - e^{-R/H})$$

γ : Proportion de Cs pouvant être entraînée annuellement par l'érosion avant incorporation. Elle dépend la période de labour des champs et régime pluviométrique annuel. Si le régime pluviométrique est caractérisé par une seule période de forte intensité de pluie et que les champs sont cultivés après la période de forte intensité des pluies, on suppose que toute la quantité de ^{137}Cs déposé aurait été érodé et donc $\gamma = 1$. Mais là où, les champs sont cultivés avant la période de forte intensité pluviométrique susceptible d'éroder, γ peut être estimé en faisant le ratio de la quantité de pluie tombée pour la période de fortes pluies érosives par la quantité totale de pluie tombée durant l'année.

H : Profondeur de relaxation des masses dans la distribution initiale du Cs dans le profil du sol.

Considérant que t_0 représente l'année de la première mise en culture du site dans les équations précédentes, l'activité totale (Bq/m^2) en Cs à la date t peut être exprimée de la manière suivante :

$$A(t) = A(t_0) e^{-(P R / d + \lambda)(t-t_0)} + \int_{t_0}^t (1 - P \gamma (1 - e^{-R/H})) I(t') e^{-(P R / d + \lambda)(t-t')} dt'$$

Où, $A(t_0)$ est la valeur de l'inventaire (Bq/m^2) à la date t_0 (an)

$$A(t_0) = \int_{1954}^{t_0} I(t') e^{-\lambda(t'-t_0)} dt'$$

Le taux d'érosion R peut être estimé en résolvant l'équation de l'activité si tous les paramètres nécessaires sont connus.

La concentration de Cs dans les sédiments délivrés est donnée par l'équation suivante :

$$C_e(t') = \frac{I(t')}{R} P \gamma (1 - e^{-R/H}) + P \frac{A(t')}{d}$$

$$A_{ex} = \int_{t_0}^t R' C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'$$

R' : taux de déposition annuelle (t/ha/an)

$$R' = \frac{A_{ex}}{\int_{t_0}^t C_d(t') e^{-\lambda(t-t')} dt'}$$

Les paramètres de ce modèle ont été déterminés sur la base des conditions locales et des activités des sites de référence. En utilisant le Modèle Mass Balance 2 pour convertir les inventaires en taux d'érosion/déposition, on ne prend pas en compte la nature sélective de l'érosion ainsi donc le facteur taille des particules $P = P' = 1$. La valeur de la profondeur de relaxation des masses dans la distribution initiale du Cs dans le profil du sol (H) a été prise par défaut selon Walling *et al.* (2011), $H = 4 \text{ kg.m}^{-2}$ pour tous les deux radioéléments (^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$). La proportion du radioélément γ pouvant être entraînée

annuellement par l'érosion avant incorporation dépend de la période du labour et du régime pluviométrique annuel des sites d'études. Sur les sites d'étude, les champs sont cultivés avant la période de forte intensité pluviométrique susceptible d'éroder le sol. Alors, γ est estimé en faisant le ratio de la quantité de pluie tombée pour la période de fortes pluies érosives par la quantité totale de pluie tombée durant l'année et est égale à 0,8. La profondeur de labour est de 20 cm sur tous les sites d'étude. Le labour est réalisé manuellement avec la houe. Cette profondeur du labour en centimètre est convertie en kilogramme par mètre carré par la formule ci-après :

$Dp = d \times p$ avec Dp = profondeur du labour en $kg.m^{-2}$; d = densité moyenne du sol du site et p = profondeur du labour en mètre. Les inputs utilisés pour le modèle sont résumés dans le tableau 17.

Tableau 17: Les paramètres locaux de conversion du modèle MBM2

Radioéléments	Paramètres	Allada	Djidja	Aplahoué
¹³⁷ Cs ou ²¹⁰ Pb _{exc}	Dp	281,0 $kg.m^{-2}$	262,0 $kg.m^{-2}$	306,0 $kg.m^{-2}$
	H	4,0 $kg.m^{-2}$	4,0 $kg.m^{-2}$	4,0 $kg.m^{-2}$
	P=P'	1,0	1,0	1,0
	γ	0,8	0,8	0,8

Source: Kouélo (2015)

Sur la base des taux d'érosion ou de déposition élémentaires obtenus par point de prélèvement, les paramètres suivants ont été calculés :

L'érosion moyenne = $\frac{E}{N_e}$; L'érosion brute = $\frac{E}{N_t}$; La déposition moyenne = $\frac{E}{N_d}$; La

déposition brute = $\frac{E}{N_t}$; L'érosion nette = $\frac{E-D}{N_t}$;

Le sédiment délivré = $\frac{E-D}{E}$

N_t = Nombre total de points échantillonnés

N_e = Nombre de points d'érosion

N_d = Nombre de points de déposition

E = Somme du taux d'érosion de tous les points érodés

D = Somme du taux de déposition de tous les points sédimentés.

Des statistiques descriptives et des graphes ont été obtenus avec Microsoft Excel 2013 et des tableaux avec Microsoft Word 2013. Avec de simples fonctions statistiques, le coefficient de variation et l'erreur admise ont été calculés à partir de l'inventaire du Césium-137 pour valider les sites de référence. L'erreur admise est calculée à partir de la formule suivante :

$$\sqrt{N} = \left[\frac{t_{(\alpha, n-1)} \cdot CV}{EA} \right]$$

3-2-3- Résultats

3-2-3-1- Activités de référence des sites

L'activité de référence du ^{137}Cs , calculée à partir des échantillons de sol, est de 424,91 ; 48,52 et 417,23 Bq.m⁻² respectivement à Govié, Lokogba et à Linsinlin. Avec les coordonnées géographiques et la pluviométrie moyenne des sites de référence, l'activité de référence du ^{137}Cs estimée avec le complément de Excel « Radiocalc » est plus faible sur tous les sites. En ce qui concerne le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$, l'activité de référence est de 85549,0 ; 8228,64 et 745,09 Bq.m⁻² respectivement à Govié, Lokogba et Linsinlin (Tableau 18). Le coefficient de variation de cet inventaire est inférieur à 30% pour le ^{137}Cs et le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$. La variabilité observée est élevée surtout sur le site de Lokogba pour le ^{137}Cs et de Linsinlin pour le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$, mais peut être considérée comme normale. L'erreur admise est supérieure à 10% pour un degré de confiance de 90% car le nombre d'échantillons requis est supérieur à celui utilisé (n = 4).

Tableau 18: Les activités de référence du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$

Sites	Paramètres	^{137}Cs (Bq.m ⁻²)		$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ (Bq.m ⁻²)
		Calculé	Estimé	Calculé
Allada	Référence	424,91	344,38	8549,05
	CV	16,33		22,42
	AE	0,16		0,24
Aplahoué	Référence	548,52	360,69	8228,64
	CV	28,96		20,17
	AE	0,28		0,21
Djidja	Référence	417,23	357,97	7545,09
	CV	10,82		27,09
	AE	0,12		0,26

CV = Coefficient de variation ; AE = Erreur admise

3-2-3-2- Inventaire et distribution des radioéléments dans les profils du sol

❖ Bassin versant de Govié

L'activité totale du ^{137}Cs au niveau de ce profil du site de référence (sol non labouré et non perturbé) est de 400 Bq.m⁻² et est distribuée sur moins de 20 cm de profondeur. L'activité spécifique du ^{137}Cs décroît de façon exponentielle de la surface vers la profondeur du profil (Figure 38). La concentration du ^{137}Cs est élevée (3,9 Bq.kg⁻¹) à la surface du sol (0 – 4 cm).

Au niveau du bassin versant où le sol est cultivé, l'activité totale du ^{137}Cs (324 Bq.m⁻²) est inférieure à celle du site de référence, indiquant qu'il y a une redistribution à la surface du sol. La distribution verticale du ^{137}Cs est plus ou moins uniforme sur la profondeur du labour (Figure 39). En effet, le mélange permanent du sol par le labour rend homogène la concentration de ce radionucléide à travers la couche du sol labouré

(environ 25 cm). Ces concentrations varient entre $0,39 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $1,07 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et leur distribution est plus profonde (36 cm) que celle du site de référence.

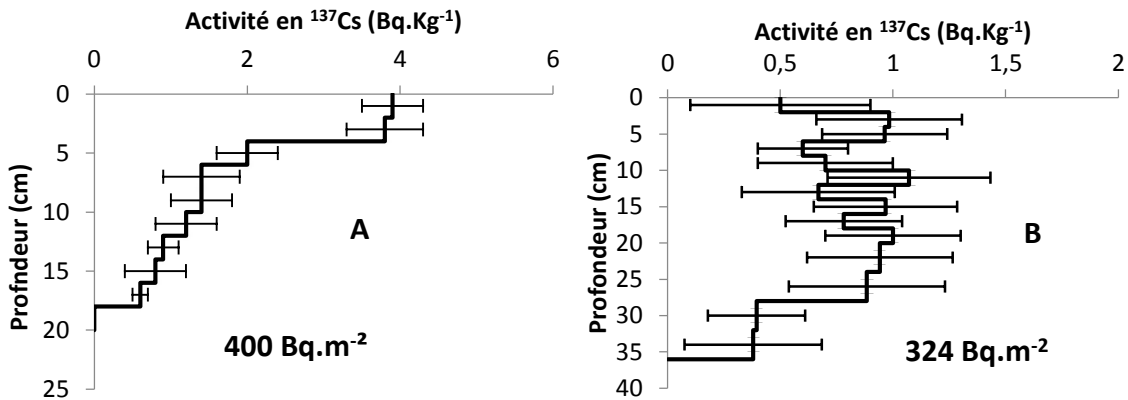


Figure 39: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Govié

❖ Bassin versant de Lokogba

Sur le site de référence, la distribution verticale de l'activité spécifique du ^{137}Cs suit une courbe de décroissance exponentielle, surtout à partir du 4 cm de la surface du sol vers la profondeur jusqu'à 24 cm (Figure 39). De 0 à 4 cm de profondeur, on observe une constance de concentration du ^{137}Cs due au processus de bio perturbation ou surtout à l'arrêt des retombées du ^{137}Cs dans les années 1960. Les concentrations du ^{137}Cs varient entre $0,40$ et $1,75 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et son activité totale de référence est de 244 Bq.m^{-2} . Les plus fortes concentrations sont contenues dans les 20 premiers centimètres.

La distribution verticale de l'activité spécifique du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ donne un résultat similaire à celui du ^{137}Cs (Figure 40) à la différence que les retombées du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ sont continues et maintiennent donc la concentration maximale du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ à la surface du sol ($94,79 \text{ Bq.kg}^{-1}$).

Sur le sol cultivé (site d'étude), la distribution est plus ou moins uniforme. En effet, le mélange permanent du sol par le labour rend homogène la concentration de ces deux radionucléides à travers la couche labourée (environ 20 cm.). Ces concentrations oscillent entre $5,92 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $38,49 \text{ Bq.kg}^{-1}$ pour $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ et entre $0,6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $1,49 \text{ Bq.kg}^{-1}$ pour le ^{137}Cs (Figures 40 et 41).

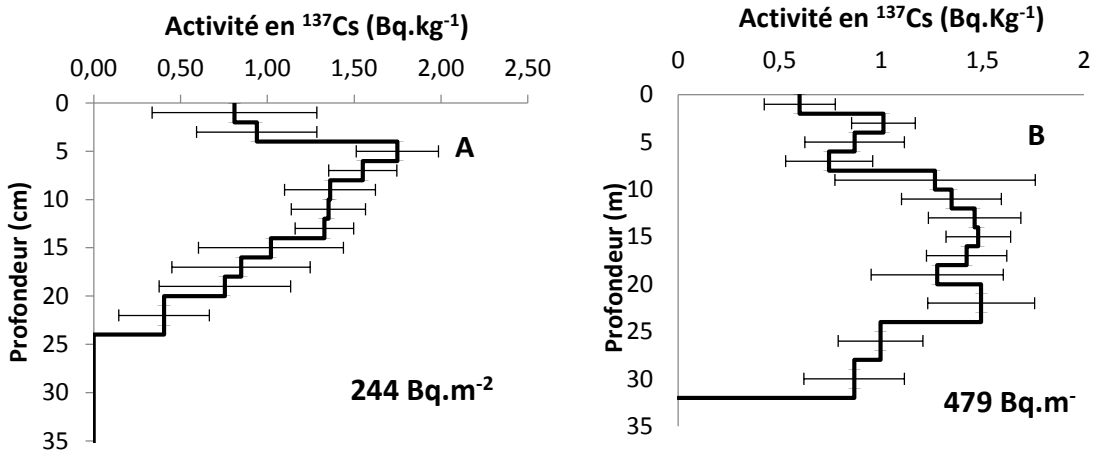


Figure 40: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Lokogba

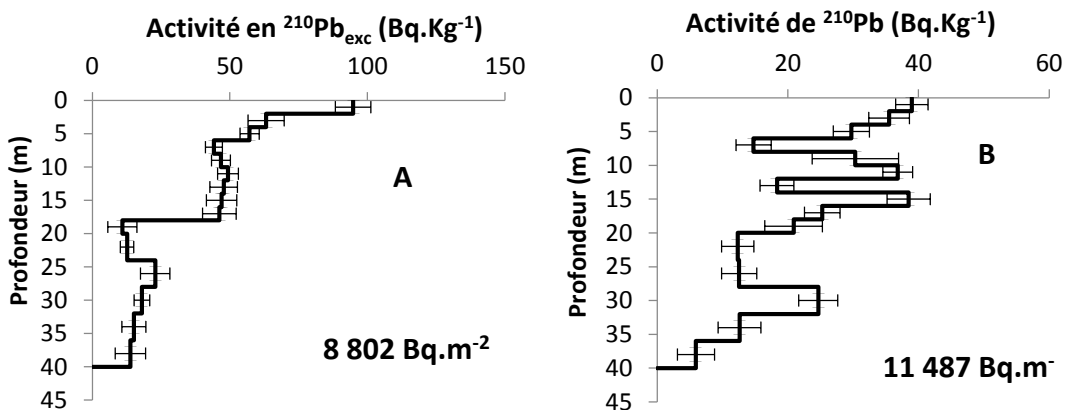


Figure 41: Inventaire et distribution du Plomb en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Lokogba

❖ Bassin versant de Linsinlin

Sur le site de référence, la distribution verticale de l'activité spécifique du ^{137}Cs ne présente pas une décroissance exponentielle de la surface vers la profondeur. Cette distribution est plus ou moins uniforme sur le profil (Figure 41). Ainsi donc, le sol de ce site de référence semble être perturbé d'une façon ou d'une autre. Mais au contraire la distribution verticale du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ présente une allure normale (décroissance exponentielle, confirmant que le sol du site n'est pas perturbé (Figure 42). Alors, l'analyse des concentrations en ^{137}Cs de ce profil est à reprendre pour détecter les erreurs constatées sur le profil.

Sur le site d'étude (sol cultivé), la distribution verticale du ^{137}Cs est plus ou moins uniforme sur la profondeur du labour. Ce résultat est conforme à ceux obtenus au niveau des autres sites. Les concentrations en ^{137}Cs varient entre $0,8 \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $1,33 \text{ Bq.kg}^{-1}$ (Figure 43). La distribution verticale du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ sur le sol cultivé n'a pas pu être réalisée.

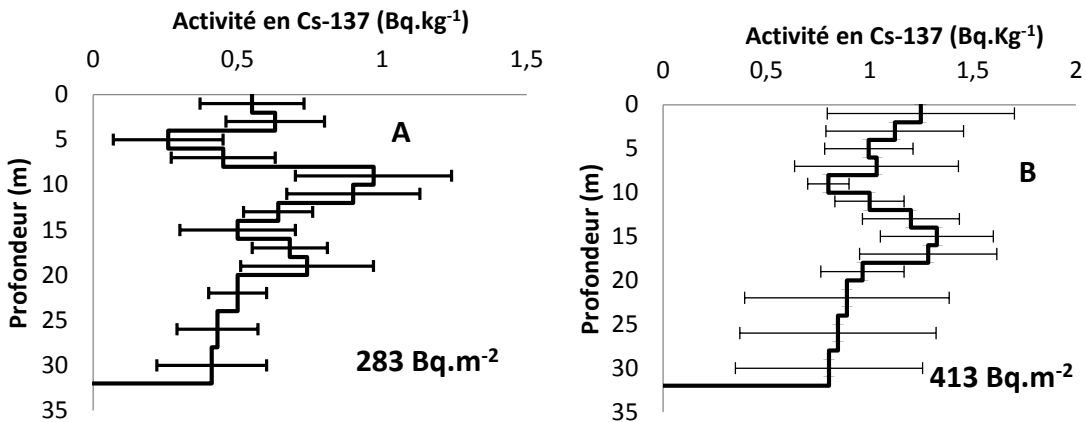


Figure 42: Inventaire et distribution du césium (^{137}Cs) dans le profil du sol du site de référence (A) et du transect 1 (B) du bassin versant de Linsinlin

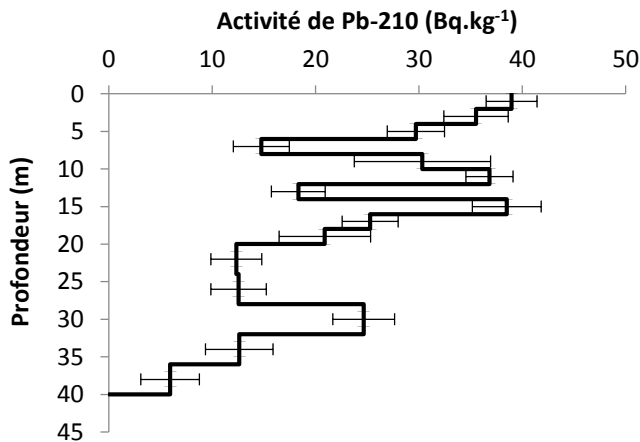


Figure 43: Inventaire et distribution du Plomb en excès ($^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) dans le profil du sol du site de référence de Linsinlin

3-2-3-3- Evaluation du taux de redistribution du sol à partir des radioéléments

Le Modèle Mass Balance 2 de Walling et *al* (2002) a été utilisé pour convertir les concentrations du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ en perte de terre et pour déterminer l'état de la dégradation du sol à moyen et long terme (50 à 100 ans). En intégrant dans ce modèle les paramètres pris sur la base des conditions locales des sites au Bénin et les valeurs des

activités de référence, les trois bassins versants sont des sites dégradés mais l'état de dégradation varie d'un site à un autre (pour tous les radioéléments utilisés).

En effet, en utilisant le ^{137}Cs comme traceur, les taux d'érosion du sol du bassin versant de Lokogba varient de $8,49 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à $51,13 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec une moyenne de $21,74 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Durant les 50 dernières années, l'érosion nette de ce bassin versant est de $17,69 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 98% de sédiments délivrés. Le dernier point du transect est le seul point de déposition avec un taux moyen de déposition de $2,50 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ (Tableau 19). Avec le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$, les taux d'érosion varient de $0,96 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ à $40,48 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ soit une moyenne de $22,39 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Durant le dernier siècle (sur 100 ans), l'érosion nette du bassin versant de Lokogba était de $15,04 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 81% de sédiments délivrés.

Le niveau de la dégradation du sol est moindre sur les bassins versants de Govié et de Linsinlin. En effet, sur le bassin versant de Govié, l'érosion nette est de $3,93 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 78 % de sédiments délivrés à moyen terme alors que durant le dernier siècle, elle est de $4,76 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 48 % des sédiments délivrés. Au niveau du bassin versant de Linsinlin, le taux d'érosion nette est de $2,17 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 72 % de sédiments délivrés sur les 50 dernières années alors qu'elle est de $5,07 \text{ T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ avec 48 % de sédiments délivrés les 100 dernières années.

Tableau 19: Evaluation de la redistribution du sol et du budget du sédiment à partir du ^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ sur les bassins versants de Govié, de Lokogba et de Linsinlin.

Sites	Govié		Lokogba		Linsinlin	
	$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$	^{137}Cs	$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$	^{137}Cs	$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$	^{137}Cs
Erosion brute ($\text{T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$)	9.82	5.06	18.66	18.11	13.44	3.00
Erosion moyenne ($\text{T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$)	11,78	6,07	22,39	21,73	18,82	4,00
Déposition brute ($\text{T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$)	5.06	1.13	3.62	0.42	8.37	0.83
Déposition moyenne ($\text{T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$)	30,36	6,79	21,72	2,50	29,31	3,31
Erosion nette ($\text{T.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$)	4,76	3,93	15,04	17,69	5,07	2,17
Sédiments délivrés	0,48	0,78	0,81	0,98	0,38	0,72

3-2-4- Discussion

Depuis les années 80, le ^{137}Cs est très utilisé pour étudier l'importance du déplacement et de l'exportation des particules de sol à moyen terme (20 – 35 ans). Les inventaires en ^{137}Cs des trois sites de référence donnent des valeurs très proches, mais faible par rapport à ceux obtenus dans plusieurs pays occidentaux et de l'Afrique du Nord. Cette infériorité s'explique par le fait que nos zones d'étude sont très distants des pays occidentaux dans lesquels tous les essais nucléaires ont été effectués (Bernard *et al.*, 1998).

Les coefficients de variation de ces inventaires varient de 11 % à 29 %. Cette variabilité des inventaires est relativement faible, comparée à celle obtenue de nombreux auteurs qui en général oscille entre 18 % et 47 % (Benmansour *et al.*, 2013 ; Owens et Walling, 1996; Sutherland, 1996). La variabilité des inventaires dans les sites de référence

est due à plusieurs sources : choix aléatoire des points d'inventaire, précision de collecte et d'analyse des échantillons. La principale source de cette variabilité résulte de la redistribution des eaux de pluie contenant le ^{137}Cs (interception par la canopée (dispersion ou concentration autour des lignes de feuillage) et la litière (restitution graduelle au sol) et concentration le long des troncs (Ritchie *et al.*, 1972 ; Elliott *et al.*, 1990 ; Miller *et al.*, 1990)). Les inventaires estimés sont inférieurs à ceux calculés. Le calcul des inventaires surestime donc de 0,16 à 0,52 selon les sites. Sutherland, en 1996, a expliqué cette surestimation car selon lui, les sites forestiers surestiment de 1,20 à 1,65 l'activité totale du ^{137}Cs . Comme nous, certains auteurs (Walling et Quine, 1995 ; Walling *et al.*, 1995 ; Walling *et al.*, 1996 ; Wallbrink et Murray, 1996b ; He et Walling, 1997) ont travaillé sur l'utilisation du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ comme marqueur de la redistribution des particules du sol suivant pratiquement les mêmes méthodes que le ^{137}Cs .

Des profils de distribution (^{137}Cs et du $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) similaires aux nôtres ont été déjà obtenus dans diverses régions du monde par plusieurs auteurs tels que He and Walling, 1997; Mabit *et al.*, 2008; Walling *et al.*, 1995; Walling et He, 1999, Benmansour *et al.*, 2010 ; Benmansour *et al.*, 2011. La distribution en profondeur est similaire pour les deux radionucléides. Elle est présente clairement une décroissance exponentielle de la surface vers la profondeur. Néanmoins, de légères différences existent entre les deux profils, dues au processus de bioperturbation qui a entraîné une constance de concentration de ^{137}Cs dans les 4 cm supérieurs. Cette concentration peut être aussi expliquée par le fait que les retombées de ^{137}Cs se sont arrêtées dans les années 1960. En contrario, les dépôts des retombées de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ sont continuels et maintiennent donc la concentration maximale de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ à la surface de la terre. Walling *et al.* (1996) pensent que le $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ peut représenter une alternative à l'utilisation du ^{137}Cs qui peut se trouver biaisée. En effet, les deux isotopes radioactifs ont des comportements physico-chimiques proches.

Sur les bassins versants (sol cultivé), la distribution est plus ou moins uniforme pour les deux isotopes radioactifs. En effet, le mélange permanent du sol par le labour rend homogène la concentration de ces deux radionucléides à travers la couche de labour. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Benmansour *et al.* (2010) ; He et Walling (1997) ; Benmansour *et al.* (2011); Benmansour *et al.* (2014).

3-3- CONCLUSION PARTIELLE

Les trois bassins versants sont très sensibles à la dégradation. Avec les pratiques agricoles intensives, les sols de ces bassins versants sont davantage dégradés. Les résultats de cette étude confirment notre hypothèse. Comparativement aux sites de référence de proximité (forêt non perturbée), le sol des bassins versants est plus compact (densité apparente élevée) et a une très faible teneur en azote total, phosphore assimilable, matière organique et en biomasse racinaire. Pour lutter contre la dégradation du sol de ces bassins versants, il faudra faire la promotion de pratiques agricoles qui préservent le sol sur les plans physique, biologique et chimique. Cela est nécessaire pour améliorer la productivité des cultures et la sécurité alimentaire de la population vivant dans ces bassins versants.

Les radioéléments (^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$) utilisés comme traceurs des mouvements du sol permettent de rendre compte du déplacement des particules de sol et d'estimer de façon quantitative les taux de perte de terre à moyen et long terme. Les taux d'érosion obtenus par les radioéléments sur les trois bassins versants étudiés sont constants dans le temps. Le bassin versant de Lokogba est plus dégradé que les bassins versants de Govié et de Linsinlin. Le sol des bassins versants étant dégradé, il faudra identifier les pratiques de conservation des sols adoptées par les agriculteurs pour freiner cette dégradation du sol.

CHAPITRE 4

EFFET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DEGRADATION DES SOLS

Dans ce chapitre, deux articles sont en cours de publication et trois articles en cours de rédactions (Annexe).

Article 1: **Kouelo, A.F., Houngnandan, H. et Azontondé, H. A.** Assessment of rainfall erosion of degraded ferralitic soil under tillage and mulching practices on three watersheds in southern Benin. En cours de publication dans le journal indexé: Applied and Environmental Soil Sciences sous le numéro 352176.v1-2.

Article 2 : **Kouelo, A.F., Houngnandan, H. et Azontondé, H. A., Benmansour, M., Bekou, A. J. et Akplo, T. M.** Effet des pratiques de conservation de sol sur la productivité du maïs dans le bassin versant de Lokogba au Bénin. En cours de publication dans le journal indexé : Agronomie Africaine sous le numéro 934.

4.1. EFFET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA REDUCTION DE L'EROSION

4-1-1- Contexte

La majorité des publications sur l'érosion des sols ont identifié ce phénomène comme l'un des problèmes environnementaux les plus pressants, car elle peut dégrader le fonctionnement de l'écosystème (Kirkby et *al.*, 2000), diminuer la productivité agricole (Jetten et Favis-Mortlock, 2006), amplifier le risque hydrogéologique (Verstraeten et Poesen, 1999) et, dans les cas graves, déplacer les populations humaines (Opie, 2000). L'érosion des sols est considérée comme l'une des menaces les plus graves pour les sols cultivés partout dans le monde (Lieskovsky et Kenderessy, 2014). Les processus d'érosion du sol sont très actifs sur les terres agricoles (Cerdà et *al.*, 2007 ; Cerdà et *al.*, 2009a). Les taux élevés d'érosion sont dues à une mauvaise gestion humaine des sols et la destruction de leur couverture végétale due au pâturage (Cerdà et Lavee, 1999 ; Mekuria et Aynekulu, 2013 ; Angassa, 2014), les incendies de forêt (González-Pelayo et *al.*, 2010), l'exploitation minière (Martin-Moreno et *al.*, 2013) et l'agriculture (Brevik, 2009 ; Cerdà et *al.*, 2009a ; Cerdà et *al.*, 2009b ; Leh et *al.*, 2013 ; Lieskovsky et Kenderessy, 2014 ; Yuan et *al.*, 2015). L'intensification de l'agriculture et de l'utilisation des pratiques culturales non appropriées des sols (labour dans le sens de la pente, utilisation des charrues à disques pulvérisant les sols, plantations arboricoles pas en courbes de niveau sur des terres en pente, ...) entraînent une suppression des éléments structurant le paysage, (retournement des prairies, agrandissement des parcelles...) et accélèrent l'érosion (Ben Slimane, 2013).

Au-delà des causes et processus naturels, le phénomène de l'érosion est accéléré par certaines activités humaines et modes d'exploitation des terres. À cause des pratiques inadaptées appliquées sur les versants, l'Homme est le facteur principal qui conditionne l'intensité de l'érosion et ses effets indésirables pour l'environnement et pour l'économie (Wazzeni, 2013). Le travail du sol et la destruction du couvert végétal sont des pratiques culturales qui affectent et accélèrent l'érosion du sol (Younsi, 2015). Le travail du sol est une pratique ancestrale, dont un des buts premiers est de créer un environnement favorable à la germination des graines et au développement des racines (Köller, 2003). Cette pratique a permis d'augmenter la productivité des cultures grâce notamment à son action de contrôle sur le développement des adventices et de fragmentation de la structure du sol. Cependant, au cours du XX^{ème} siècle de nouveaux problèmes de fertilité des sols sont apparus, notamment aux Etats-Unis où les graves problèmes d'érosion ("Dust Bowl") ont conduit au développement de techniques alternatives au labour. Depuis, les résultats de nombreuses recherches sous différentes zones climatiques dans le monde ont révélé des problèmes communs aux sols labourés : tassement, baisse des teneurs en matières organiques des sols (MOS), érosion, limitation de la circulation de l'eau (Lal *et al.*, 2007) et coût énergétique et financier de cette pratique (Monnier, 1994). Ces problèmes ont conduit au développement des techniques alternatives au labour, regroupées sous le terme de travail du sol de conservation lorsqu'elles laissent en surface plus de 30 % des résidus de la culture précédente (Köller, 2003). Ces techniques couvrent une large gamme d'opérations allant du semis direct au travail du sol réduit sans retournement de la couche de sol avec un outil à dents ou à disques. Le labour quant à lui laisse moins de 15 % des résidus de culture en surface après l'implantation de la culture suivante (Labreuche *et al.*, 2007). La présence d'un mulch en surface et la limitation des perturbations verticales du sol protègent le sol de l'érosion éolienne et hydrique, limitent les pertes de MOS, favorisent l'activité biologique des sols et permettent d'augmenter la largeur de travail des outils et de réduire ainsi la charge de travail des agriculteurs sans diminuer pour autant le rendement des cultures (Kern et Johnson, 1993; Köller, 2003). La nature et l'intensité du couvert végétal jouent un rôle très important dans la protection du sol contre l'érosion. En effet, la végétation favorise l'infiltration de l'eau et le maintien du sol grâce à son système racinaire, et son développement en surface freine le ruissellement (Ben Slimane, 2013). Le couvert végétal est considéré comme un facteur de conservation des sols, d'une part par un effet direct (atténuation de l'énergie cinétique des gouttes de pluie), et d'autre part par un effet indirect (enrichissement du sol en matière organique et amélioration de ses propriétés) (Cherif, 2012). Sous le couvert de la végétation naturelle, l'érosion du sol est inexistante ou minime. Avec la suppression de la couverture végétale et de la jachère, la fertilité inhérente est drastiquement réduite et l'érosion accélérée (Isikwue, 2005 ; Nyakatawa *et al.*, 2001 ; Pandey *et al.*, 2007). L'érosion des sols induite par le labour est importante et contribue au processus de dégradation des sols qui se produit dans la plupart des terres en pente. Les objectifs de cette étude étaient de déterminer la façon dont les divers types du travail du sol et le mulching affectent l'érosion des sols dans cette région

et d'utiliser les résultats obtenus pour identifier les pratiques de gestion durable des terres qui permettraient de réduire l'érosion du sol à un niveau tolérable.

4-1-2- Méthodes

Sur le bassin versant de Govié dans la commune d'Allada, deux facteurs ont été étudiés: du travail de sol (sans labour et labour à plat) et le mulching (0 et 3 t.ha⁻¹ de mulch). Trois épisodes de pluie ont été utilisés pour recueillir des données (Pluies de 6, 14 et 25 Juin, 2014). Sur le bassin versant de Lokogba dans la commune d'Aplahoué, deux facteurs ont été étudiés: Labour (sans labour, minimum labour, billonnage et labour à plat) et le mulching (0 et 3 t.ha⁻¹ de mulch). La dose de 3 t.ha⁻¹ de mulch donne environ 50% de couverture du sol et une réduction de 90% de l'érosion des sols selon Erenstein (1997). Quatre épisodes de pluie ont été utilisés pour la collecte des données (11 et 21 Juin ; 03 et 16 Juillet, 2014). Sur le bassin versant de Linsinlin dans la commune de Djidja, deux facteurs ont été étudiés: Labour (sans labour, minimum labour et billonnage) et le mulching (0 et 3 t.ha⁻¹ de mulch). Le minimum labour est un travail superficiel du sol qui permet de préparer seulement le lit de semis en remuant le sol l'aide d'une petite houe. Cinq épisodes de pluie ont été utilisés pour la collecte des données (24 Juin ; 17 Juillet ; 19, 25 et 29 Septembre, 2014). Les parcelles d'érosion ont été installées dans un seul bloc, les événements de pluie constituant la répétition. Ainsi, 18 parcelles ont été installées au total. Une parcelle témoin a été installée sur chaque site. Elle est encore appelée parcelle de Wischmeier, entièrement nue et sans culture. Ces parcelles, de forme rectangulaire de 3 m x 7 m, sont délimitées par les tôles métalliques (Figure 44). Les tôles métalliques sont enfoncées dans le sol sur 10 cm de profondeur, de façon à avoir un trop-plein de 20 cm à l'extérieur. Le centre de la largeur en aval de la parcelle est équipé d'une gouttière de collecte d'eau (Figure 45). Les eaux de ruissellement ont été recueillies grâce à cette gouttière placée à la sortie de la parcelle.



Figure 44 : Parcelle d'érosion dans un champ de maïs sur le bassin versant de Linsinlin.



Figure 45 : Gouttière de collecte des eaux de ruissellement

Les données suivantes ont été collectées :

❖ **Les caractéristiques du sol:** Avant l'installation des parcelles d'érosion, des échantillons de sol ont été prélevés, séchés à l'air et tamisés à travers une maille de 2 mm. La granulométrie du sol est déterminée selon la méthode de la pipette de Robinson, la densité apparente et la porosité du sol sont calculées. Le carbone organique du sol par méthode d'Anne modifiée est également déterminé dans des échantillons de sol.

❖ **Le volume des eaux de ruissellement:** Impossible de stocker tout le volume des eaux de ruissellement, le partitionnement a été opéré à l'aide de deux bidons de 25 litres. Le premier est connecté à la parcelle d'érosion par un tuyau PVC de 40 mm de diamètre. Il est percé dans sa partie supérieure de 8 trous identiques dont l'une est reliée à la seconde gouttière à travers un tuyau PVC de 20 mm de diamètre. Après chaque événement de précipitations d'au moins 30 minutes, le volume des eaux de ruissellement (V_r) est recueilli et mesuré.

$V_r = V_1 + 8 \times V_2$ avec V_1 = Volume des eaux de ruissellement de la première gouttière et V_2 = Volume des eaux de ruissellement de la deuxième gouttière).

❖ **La perte de sol:** Les sédiments déposés au fond de chaque gouttière sont recueillis, séchés à l'air libre et pesés. L'eau de ruissellement est homogénéisée et 200 ml d'aliquote est recueillies et séchées dans un four à 50 °C pour déterminer sa charge de sédiments. La charge de sédiments ramenée au volume total des eaux de ruissellement est ajoutée au poids de sédiments de fond pour la perte de terre totale (PT).

$PT = T_f + C_s (V_r / 200)$ avec T_f = sédiments déposés au fond des gouttières; V_r = volume des eaux de ruissellement et C_s = Charge de sédiments.

Les données recueillies ont été soumises à une analyse de la variance (ANOVA) suivie de la comparaison des moyennes par utilisation du test de la plus petite différence significative au seuil de 5%. La version du logiciel SAS 9.2 a été utilisée pour l'analyse statistique des données. Le logiciel Microsoft Excel 2013 a été utilisé pour la saisie des données et la réalisation des graphes.

4-1-3- Résultats

4-1-3-1- Propriétés physico-chimiques du sol

Les propriétés physiques des sols des sites d'études sont presque identiques. La densité apparente et la porosité sont sensiblement égales. Les sites de Lokogba et de Linsinlin ont des teneurs en argile et en limon identiques. Sur le site de Govié, le sol est beaucoup plus riche en argile qu'en limon (Tableau 20). Au niveau de tous les sites, le sol a alors une même sensibilité à l'érosion en considérant la texture et la densité apparente du sol. Nous pouvons alors comparer les résultats de l'érosion du sol de ces sites.

Tableau 20: Les caractéristiques physiques des sols des sites d'études

Sites	Granulométrie (%)				Densité apparente (g.cm ⁻³)	Porosité (%)
	Sable	Limon	Argile	Texture		
Govié	61,09	06,38	32,53	Limono-argilo- sableuse	1,51	39,93
Lokogba	65,18	17,79	17,03	Limono-sableuse	1,60	40,29
Linsinlin	56,86	20,59	22,55	Limono-argilo- sableuse	1,54	39,48

Les propriétés chimiques des sols des sites d'études ont été déterminées (Tableau 21). Si les sols des sites de Lokogba et de Linsinlin sont légèrement acides, celui du site de Govié est modérément acide. Le sol des trois sites sont moyennement riches en azote (Tekalign et *al.*, 1991), pauvre en matière organique et en phosphore assimilable (CRAAQ, 2005). Le sol du site de Lokogba est moyennement riche en phosphore total. Le sol du site de Linsinlin est bien pourvu en phosphore total et celui de Govié est très riche en phosphore total. Le sol du site de Linsinlin est très pauvre en calcium (teneur en $\text{Ca}^{2+} < 500 \text{ mg.kg}^{-1}$), très riche en magnésium (teneur en $\text{Mg}^{2+} > 180 \text{ mg.kg}^{-1}$) et riche en potassium ($175 < \text{K}^+ < 300 \text{ mg.kg}^{-1}$). Le sol du site de Lokogba est pauvre en calcium ($500 < \text{Ca}^{2+} < 1000 \text{ mg.kg}^{-1}$), riche en magnésium ($80 < \text{Mg}^{2+} < 180 \text{ mg.kg}^{-1}$) et a une teneur moyenne en potassium ($50 < \text{K}^+ < 175 \text{ mg.kg}^{-1}$). Le sol du site de Govié pauvre en calcium ($500 < \text{Ca}^{2+} < 1000 \text{ mg.kg}^{-1}$), très riche en magnésium (teneur en $\text{Mg}^{2+} > 180 \text{ mg.kg}^{-1}$) et en potassium ($\text{K}^+ > 300 \text{ mg.kg}^{-1}$).

Tableau 21: Les caractéristiques chimiques des sols des sites d'études

Sites	pH		N	Corg	C/N	Pass	Ptot	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	S
	H ₂ O	KCl	(%)			(ppm)		(mg.kg ⁻¹ sol)			
Govié	5,36	4,52	0,164	1,191	7,42	7,32	163,81	830,74	459,71	669,61	1960,06
Lokogba	6,03	5,34	0,152	0,981	6,55	7,51	69,93	698,23	128,83	145,11	972,17
Linsinlin	5,94	5,66	0,119	1,453	12,10	7,89	81,86	446,36	241,14	186,73	874,23

4-1-3-2- Ruissellement et perte de terre

Au niveau du bassin versant de Govié, le travail du sol a un effet significatif sur l'érosion hydrique (Tableau 22). En effet, le travail du sol a réduit significativement le taux de ruissellement de 24% (contrôle) à 3% (Semis direct) et à 2% (Labour) et la perte de terre de 2950 kg/ha (control) à 407 kg/ha (semis direct) et à 632 kg/ha (Labour) par pluie moyenne de 15,6 mm. Le mulching a réduit aussi significativement le taux de

ruissellement de 11% (sans mulch) à 0,3% (avec mulch) et la perte de terre de 1656 kg/ha (sans mulch) à 30 kg/ha (avec mulch) par pluie moyenne de $15,6 \pm 1,2$ mm.

Tableau 22: Effet du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Govié

Facteurs d'étude	Modalités	Ruissellement (%)	Perte de terre (kg.ha ⁻¹ .pluie ⁻¹)
Labour	Témoin	24,26 ± 1,26a	2949,8 ± 218,41a
	Sans labour	3,17 ± 1,28b	406,8 ± 192,34b
	Labour à plat	1,9 ± 0,8b	632,2 ± 336,26b
	PPDS	1,65	630
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001
Mulching	Sans Mulch	11,3 ± 3,28a	1655,8 ± 365,15a
	Mulch	0,25 ± 0,06b	30,2 ± 6,53b
	PPDS	1,3	498,06
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	0,0002

PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%

Tableau 23: Effet du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Lokogba

Facteurs d'étude	Modalités	Ruissellement (%)	Perte de terre (kg.ha ⁻¹ .pluie ⁻¹)
Tillage	Témoin	3,55 ± 0,77a	3726,8 ± 264,33a
	Sans labour	0,65 ± 0,34b	90,6 ± 42,81c
	Minimum labour	0,18 ± 0,1b	186 ± 98,1c
	Labour à plat	0,45 ± 0,31b	698,1 ± 258,52b
	Billonnage	0,09 ± 0,04b	64,6 ± 27,91c
	PPDS	0,85	345,15
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001
Mulching	Sans Mulch	1,22 ± 0,34a	1123,5 ± 323,41a
	Mulch	0,05 ± 0,01b	46,9 ± 17,05b
	PPDS	0,52	211,36
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001

PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%

Au niveau du bassin versant de Lokogba, le travail du sol a réduit significativement l'érosion du sol (Tableau 23). Le taux de ruissellement a été réduit de

4% (contrôle) à 0,1% (billonnage) et la perte de terre de 3727 kg/ha (contrôle) à 65 kg/ha (billonnage) pour une pluie moyenne de $48,0 \pm 16,7$ mm. Le mulching a aussi réduit significativement le taux de ruissellement de 57,4% et la perte de terre de 95,8%.

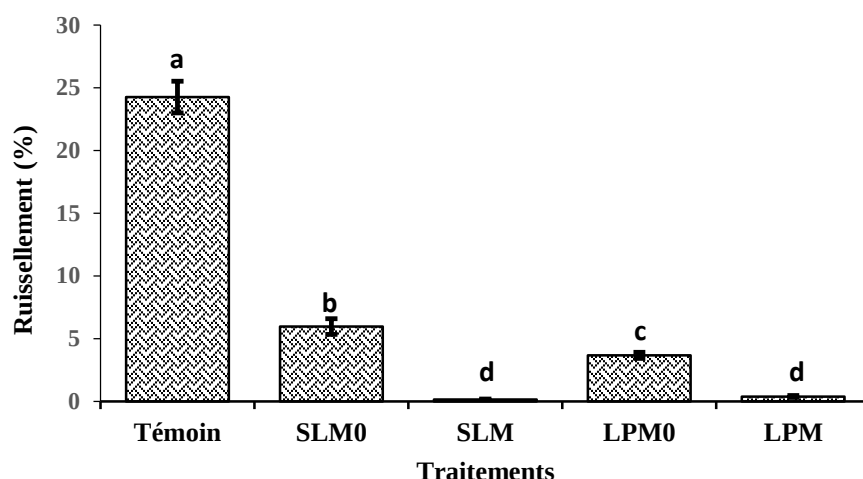
Les mêmes résultats ont été obtenus dans le bassin versant de Linsinlin où le travail du sol a réduit significativement le taux de ruissellement de 3,2% (control) à 0,0% (billonnage) et la perte de terre de 713 kg/ha (contrôle) à 4 kg/ha (billonnage) pour une pluie moyenne de $25,3 \pm 3,8$ mm (Tableau 24). Le taux de ruissellement et la perte de terre ont été significativement et respectivement réduits de 77% et de 86%.

Table 24: Effet du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement et la perte de terre au niveau du bassin versant de Linsinlin

Facteurs d'étude	Modalités	Ruissellement (%)	Perte de terre (kg.ha ⁻¹ .rain ⁻¹)
Tillage	Témoin	$3,24 \pm 0,21a$	$713,13 \pm 60,94a$
	Sans labour	$0,66 \pm 0,3b$	$67,38 \pm 29,79c$
	Minimum labour	$1,41 \pm 0,34c$	$221,21 \pm 57,54b$
	Billonnage	$0,01 \pm 0,006c$	$3,86 \pm 1,73c$
	PPDS	0,74	103,31
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001
Mulching	Sans Mulch	$1,58 \pm 0,31a$	$294,14 \pm 66,76a$
	Mulch	$0,36 \pm 0,2b$	$40,49 \pm 19,66b$
	PPDS	0,5	70,58
	Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001

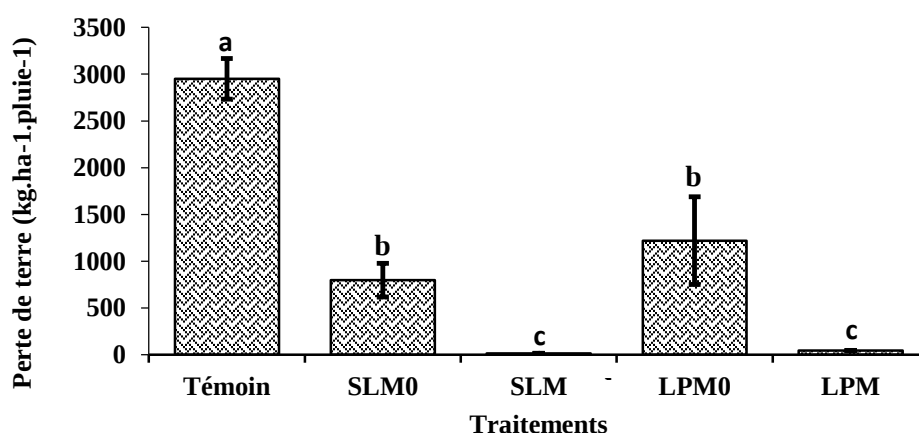
PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%

La combinaison des facteurs « travail du sol et mulching » a également réduit significativement l'érosion hydrique du sol. En effet, si le taux de ruissellement et la perte de terre sont les plus élevés au niveau de la parcelle contrôle, ils ont donné les plus faibles valeurs au niveau du traitement labour et mulching 0,13% et 15,8kg/ha respectivement dans le bassin versant de Govié (Figures 46 et 47) ; 0,005% et 3,8 kg/ha respectivement dans le bassin versant de Lokogba (Figures 48 et 49). Mais, dans le bassin versant de Linsinlin, le billonnage avec le mulching a donné le taux de ruissellement et la perte de terre les plus faibles (0,001% et 1,24 kg/ha) respectivement (Figures 50 et 51).



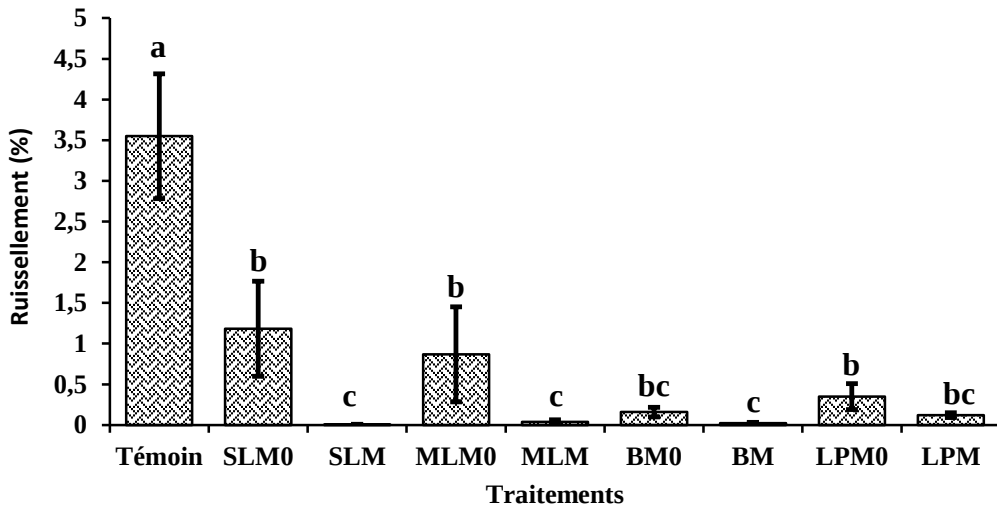
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 46: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Govié



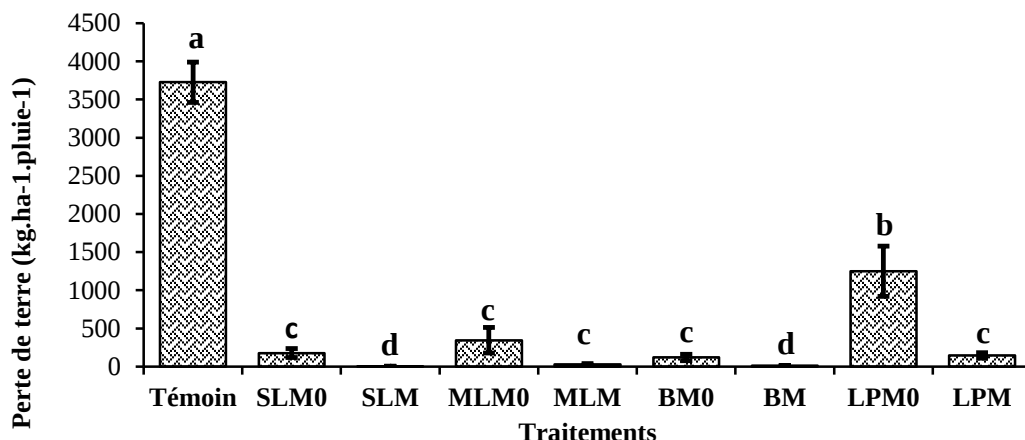
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 47: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Govié



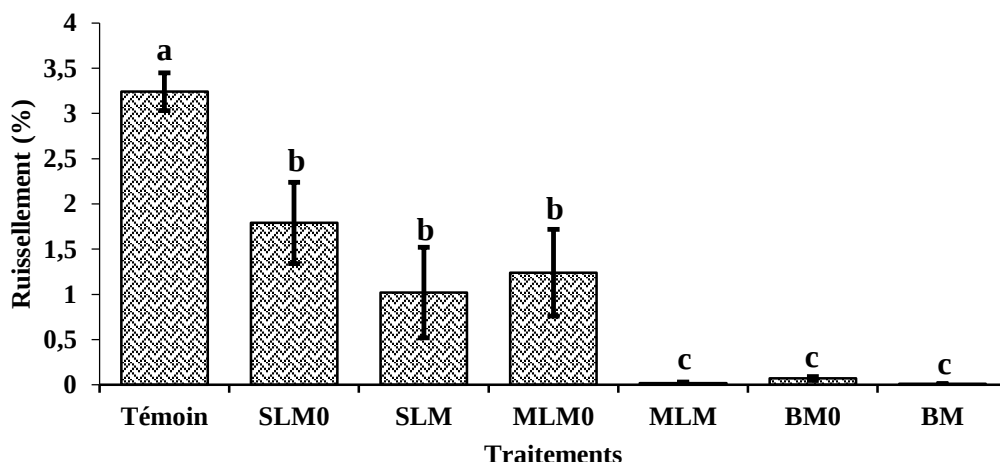
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 48: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Lokogba



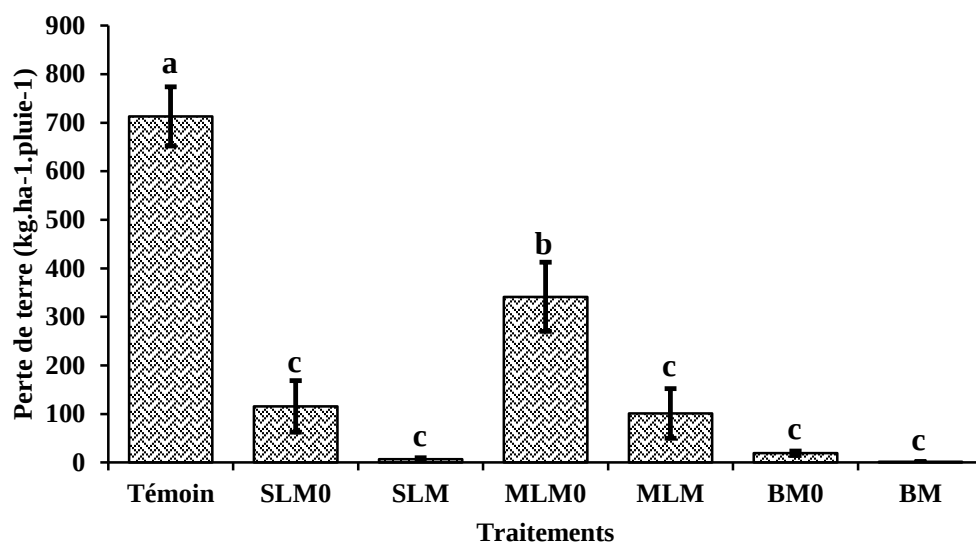
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 49: Effet combiné du du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Lokogba



Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 50: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur le ruissellement au niveau du bassin versant de Linsinlin



Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 51: Effet combiné du travail de sol et du mulching sur la perte de terre au niveau du bassin versant de Linsinlin

4-1-3-3- Perte d'éléments nutritifs

L'érosion hydrique entraîne non seulement le ruissellement et la perte de terre, mais aussi et surtout la perte de nutriments essentiels à la croissance, au développement et à la productivité des cultures. Sur tous les sites étudiés, le travail du sol comme le mulching a un effet significatif sur la perte en nutriments du sol.

Sur le bassin versant de Govié, la parcelle témoin (parcelle nue, sans couvert végétal, ni culture) a entraîné la plus grande perte de nutriments du sol. Le travail du sol a réduit la perte de nutriments du sol sous l'effet de l'érosion mais cette réduction n'est pas significative par rapport au semis direct. La perte de nutriments dans un système de semis direct est de 1,39 kg de N ; 0,23 kg de P ; 3,26 kg de K ; 4,02 kg de Ca ; 3,87 kg de Mg et 55,62 kg de MO du sol par pluie moyenne de 15,6 mm d'eau. Dans un système de labour à plat, la perte est très peu moindre donc sans aucune différence significative (Tableau 25). La pratique du mulching réduit significativement la perte de nutriments du sol de 98% pour l'azote, de 99% pour le phosphore et le potassium, 98% pour le calcium, 99% pour le Magnésium et 98% MOS (Matière Organique du Sol).

Sur le bassin versant de Lokogba, la parcelle témoin a engendré une perte de nutriments de sol de 13 kg de N ; 0,66 kg de P ; 3,83 kg de K ; 12,05 kg de Ca ; 4,69 kg de Mg et 122,97 kg de MOS par pluie moyenne de 48,0 mm d'eau (Tableau 26). Le travail

du sol ou le mulching a réduit significativement cette perte de nutriments du sol. Le billonnage perpendiculairement à la pente a entraîné la perte minimale de nutriments du sol. Mais pour la plupart des nutriments, la perte ne diffère pas significativement l'une de l'autre par rapport au type de labour par rapport au type de labour.

Par contre, la différence est hautement significative (au seuil de 0,1%) entre la pratique ou non de mulching. La pratique de mulching a réduit la perte de nutriments de 97% pour l'azote ; 99% pour le phosphore ; 99% pour le potassium ; 99% pour le calcium ; 98% pour le Magnésium et 98% pour la matière organique.

Sur le bassin versant de Linsinlin, les résultats sont similaires à ceux obtenus dans les deux sites précédents à la différence que le minimum labour et le billonnage perpendiculairement à la pente ont réduit significativement la perte de nutriments par rapport au zéro labour. Le mulching a aussi réduit significativement la perte de nutriments de 94% pour l'azote ; 99% pour le phosphore ; 94% pour le potassium ; 94% pour le calcium ; 95% pour le magnésium et 91% pour la matière organique par pluie moyenne de 25,3 mm d'eau. La combinaison du labour et du mulching lutte aussi efficacement et même plus contre la perte des nutriments du sol.

Tableau 25: Effet du travail de sol et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Govié.

Facteurs	Azote (kg/pluie)	Phosphore (kg/pluie)	Potassium (kg/pluie)	MOS (kg/pluie)	Calcium (kg/pluie)	Magnésium (kg/pluie)
Labour						
Parcelle Témoin	9,78 ± 1,08a	0,23 ± 0,03a	3,26 ± 0,02a	55,62 ± 6,84a	4,02 ± 0,51a	3,868 ± 0,35a
Sans labour	1,39 ± 0,76b	0,016 ± 0,006b	0,21 ± 0,09b	6,81 ± 3,52b	0,398 ± 0,22b	0,461 ± 0,23b
Labour	1,12 ± 0,52b	0,013 ± 0,008b	0,47 ± 0,28b	7,81 ± 3,57b	0,255 ± 0,14b	0,137 ± 0,06b
PPDS	1,88	0,0289	0,485	10,41296	0,725	0,496
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Mulching						
Sans Mulch	4,88 ± 1,32a	0,0943 ± 0,033a	1,534 ± 0,45a	27,84 ± 7,43a	1,759 ± 0,59a	1,681 ± 0,57a
Mulch	0,09 ± 0,02b	0,0008 ± 0,0001b	0,014 ± 0,002b	0,65 ± 0,22b	0,024 ± 0,006b	0,01 ± 0,002b
PPDS	1,49	0,02	0,38	8,22	0,57	0,39
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

Tableau 26: Effet du travail du sol et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Lokogba.

Facteurs	Azote (kg/pluie)	Phosphore (kg/pluie)	Potassium (kg/pluie)	MOS (kg/pluie)	Calcium (kg/pluie)	Magnésium (kg/pluie)
Labour						
Parcelle Témoin	13,08 ± 1,23a	0,6576 ± 0,09a	3,835 ± 0,39a	122,97 ± 6,22a	12,052 ± 0,61a	4,688 ± 0,21a
Sans labour	1,62 ± 0,59b	0,0154 ± 0,006b	0,334 ± 0,13b	23,98 ± 8,41b	0,691 ± 0,24b	0,485 ± 0,21b
Minimum labour	0,53 ± 0,29bc	0,0025 ± 0,001b	0,087 ± 0,04b	4,28 ± 2,01c	0,176 ± 0,09c	0,072 ± 0,04c
Labour à plat	0,21 ± 0,1b	0,0039 ± 0,002b	0,048 ± 0,024b	2,77 ± 1,41c	0,123 ± 0,06c	0,035 ± 0,02c
Billonnage	0,16 ± 0,07b	0,0035 ± 0,002b	0,031 ± 0,014b	0,99 ± 0,49c	0,05 ± 0,028c	0,013 ± 0,006c
PPDS	1,14	0,0655	0,316	5,78	0,507	0,271
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Mulching						
Sans Mulch	3,54 ± 1,15a	0,1411 ± 0,06a	0,956 ± 0,34a	36,88 ± 10,62a	2,80 ± 1,07a	1,164 ± 0,42a
Mulch	0,1 ± 0,04b	0,0006 ± 0,0003b	0,013 ± 0,005b	0,67 ± 0,24b	0,036 ± 0,01b	0,019 ± 0,008b
PPDS	0,7	0,0401	0,193	3,5342	0,31	0,166
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

Tableau 27: Effet du travail du sol et du mulching sur la perte des nutriments du sol au niveau du bassin versant de Linsinlin.

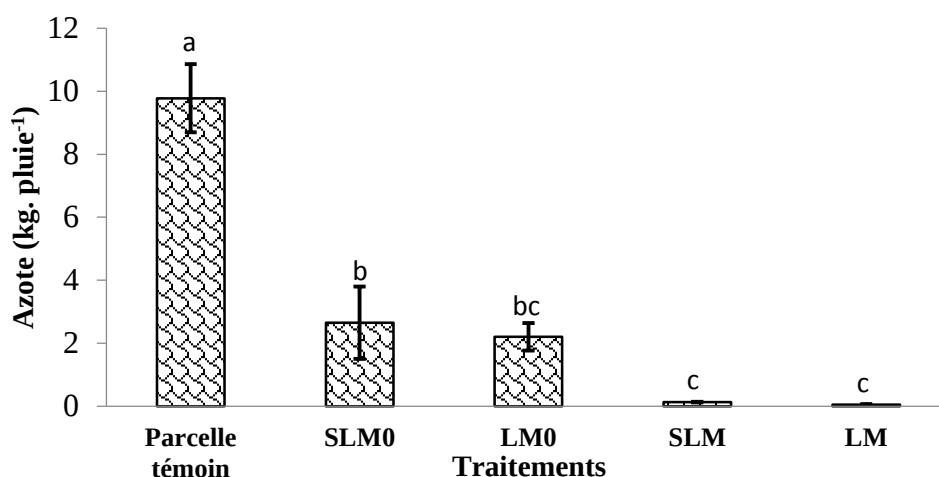
Facteurs	Azote (kg/pluie)	Phosphore (kg/pluie)	Potassium (kg/pluie)	MOS (kg/pluie)	Calcium (kg/pluie)	Magnésium (kg/pluie)
Labour						
Parcelle Témoin	4,749± 0,35a	0,2289± 0,10a	0,983± 0,22a	47,99 ± 4,29a	3,951± 0,31a	0,931± 0,13a
Sans labour	0,602± 0,15b	0,0107± 0,0035b	0,14± 0,04b	12,53 ± 4,43b	0,635± 0,21b	0,129± 0,04b
Minimum labour	0,17± 0,077c	0,0014± 0,0008b	0,042± 0,02b	2,41 ± 1,16c	0,19± 0,10c	0,026± 0,01bc
Billonnage	0,01± 0,005c	0,0001± 0,0001b	0,001± 0,0005b	0,064 ± 0,03c	0,003± 0,002c	0,001± 0,0005c
PPDS	0,371	0,0885	0,199	7,59	0,43	0,117
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	0.0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Mulching						
Sans Mulch	1,506 ± 0,44a	0,0627 ± 0,03a	0,323 ± 0,10a	18,33 ± 4,71a	1,344 ± 0,37a	0,3 ± 0,09a
Mulch	0,096 ± 0,048b	0,0008 ± 0,0004b	0,019 ± 0,01b	1,56 ± 0,99b	0,077 ± 0,38b	0,014± 0,006b
PPDS	0,253	0,0605	0,136	5,18062	0,294	0,02
Probabilité ($\alpha = 0,05$)	<0,0001	0,0451	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001

PPDS : Plus Petite Différence Significative ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

Sur le bassin versant de Govié, le labour à plat et le semis direct combinés avec le mulching constituent les meilleurs systèmes de lutte contre la perte des éléments nutritifs du sol et de la matière organique. Ils réduisent la perte des éléments nutritifs de 97 à 99% (Figures 52 ; 53 ; 54 ; 56 et 57) et la matière organique de 93% (Figure 55).

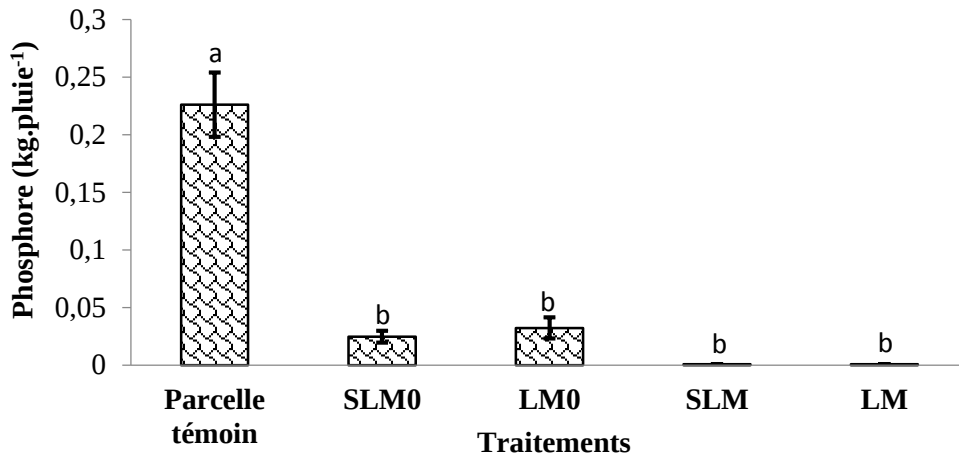
Sur le bassin versant de Lokogba, trois systèmes sont efficaces dans la lutte contre la perte des éléments nutritifs et de la matière organique. Il s'agit du labour à plat, du minimum labour et du billonnage perpendiculaire à la pente, tous en combinaison avec le mulching. Ils réduisent de 99 à 100% la perte des éléments nutritifs (Figures 58 ; 59 ; 60 ; 62 et 63) et de la matière organique (Figure 61).

Ces résultats sont similaires à ceux du bassin versant de Linsinlin. En effet, la combinaison du mulching et du minimum labour/billonnage perpendiculaire à la pente réduisent presque totalement la perte des éléments nutritifs du sol (Figures 64 ; 65 ; 66 ; 68 et 69) et de la matière organique (Figure 67) par érosion de 99 à 100%. Cependant le billonnage sans mulching, perpendiculaire à la pente réduit aussi au maximum la perte éléments nutritifs du sol et de la matière organique par l'érosion.



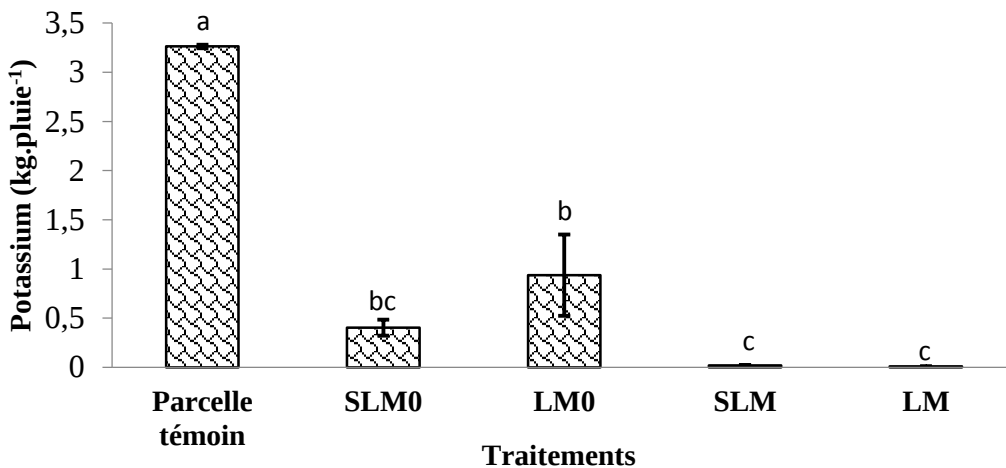
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 52: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en azote par érosion au niveau du bassin versant de Govié



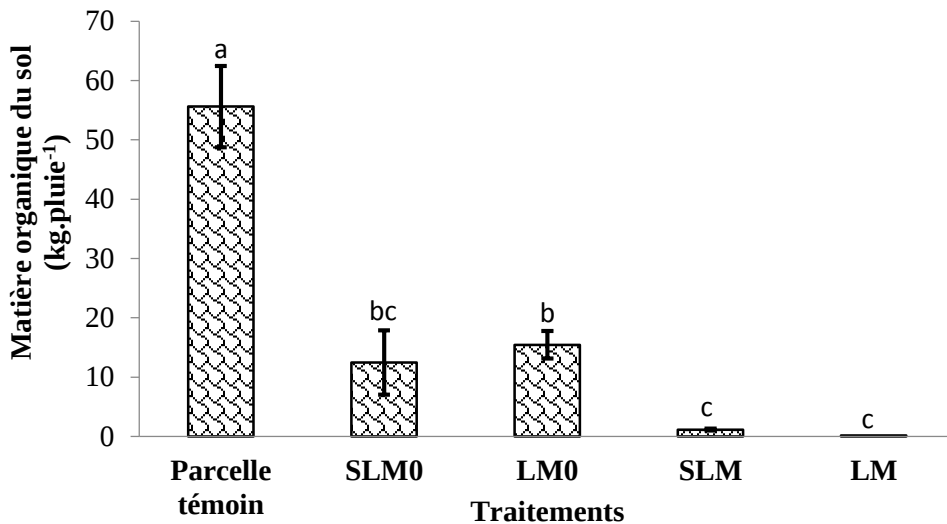
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 53: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Govié



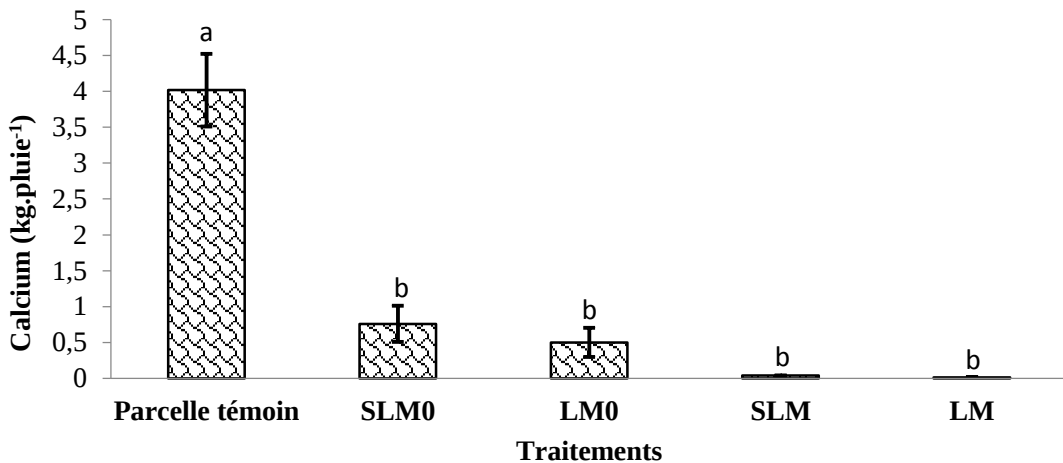
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 54: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du potassium par érosion au niveau du bassin versant de Govié



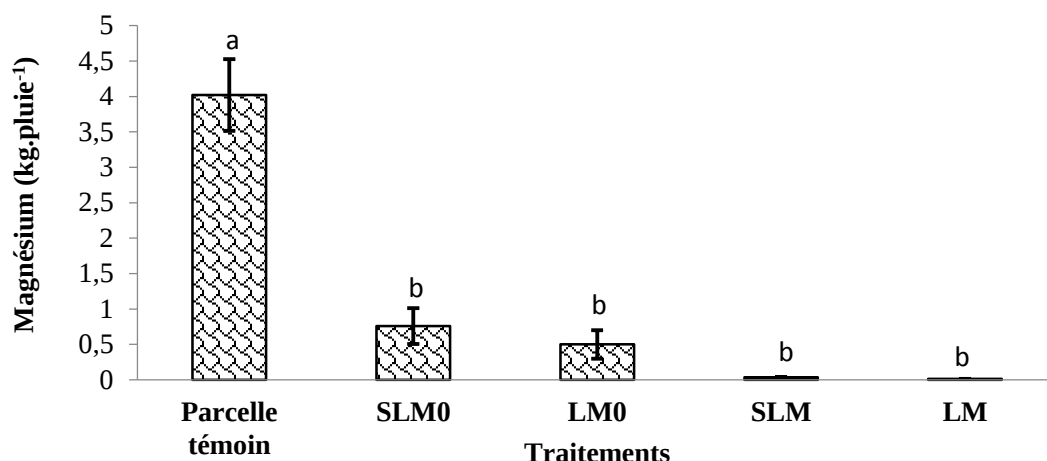
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 55: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Govié



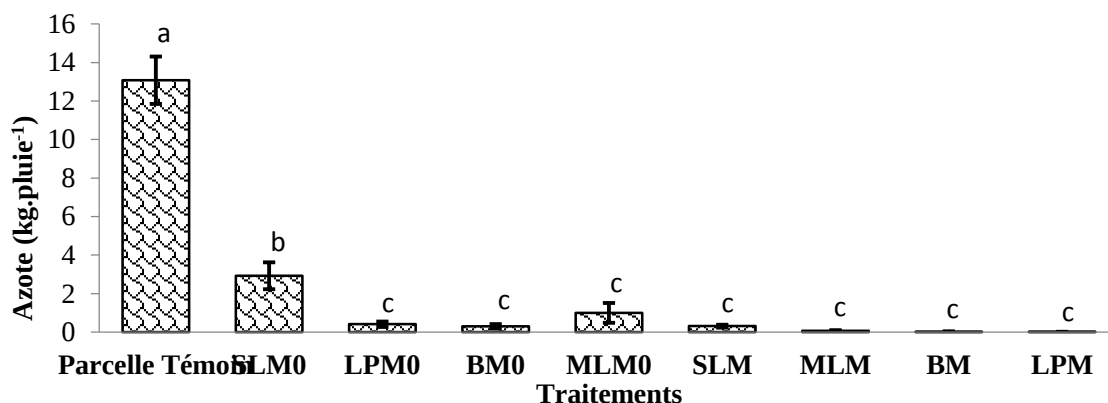
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 56: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Govié



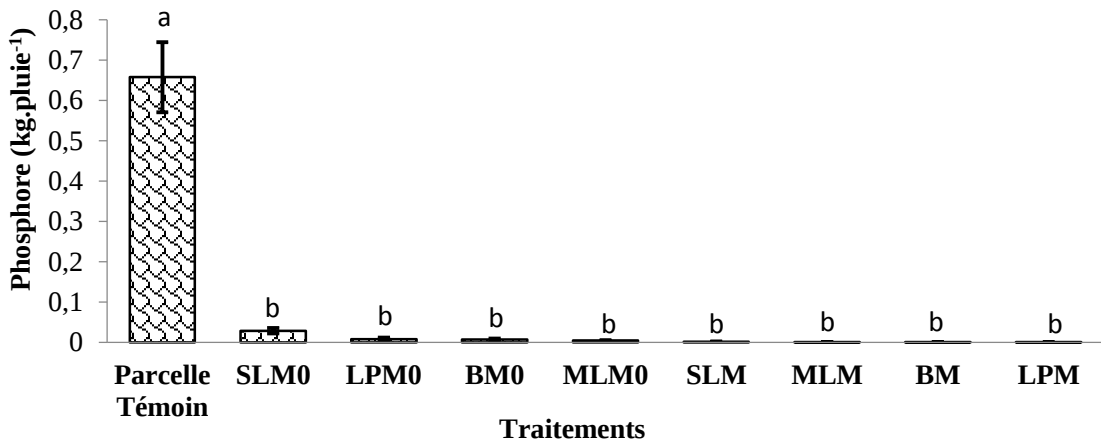
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 57: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Govié



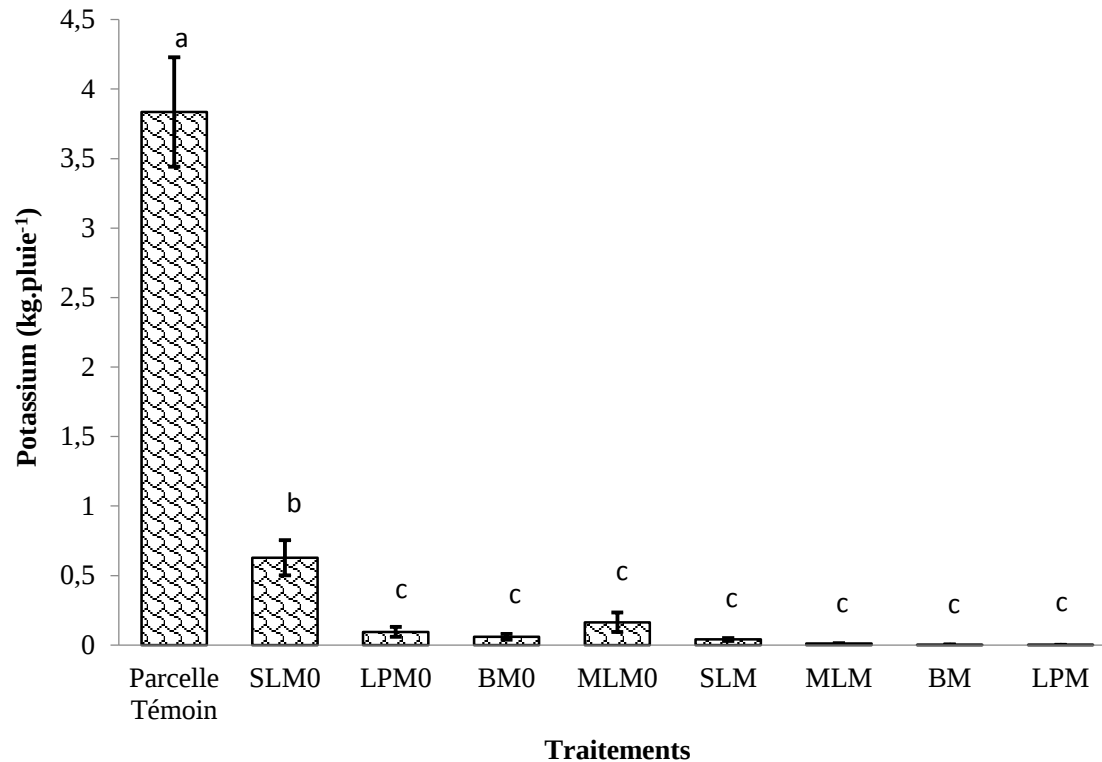
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 58: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en Azote par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



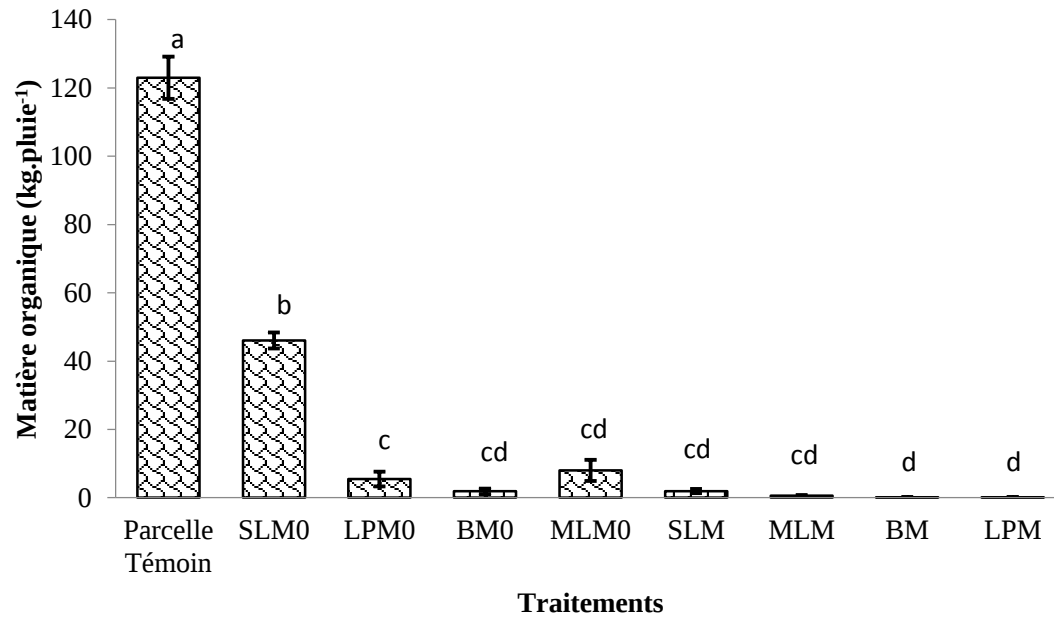
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 59: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



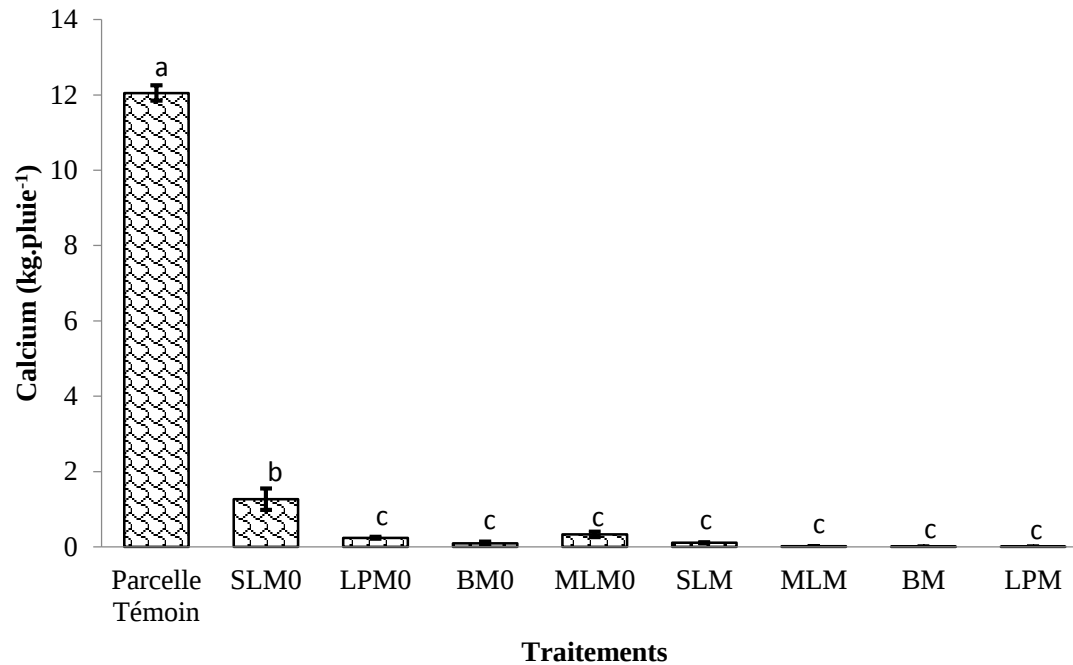
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 60: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Potassium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



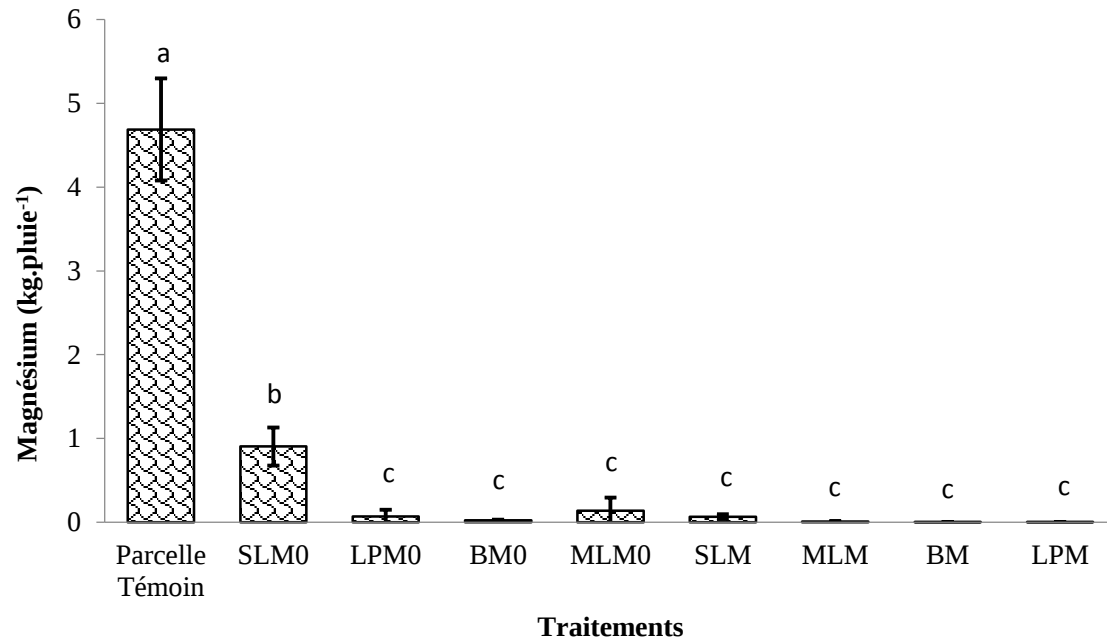
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 61: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



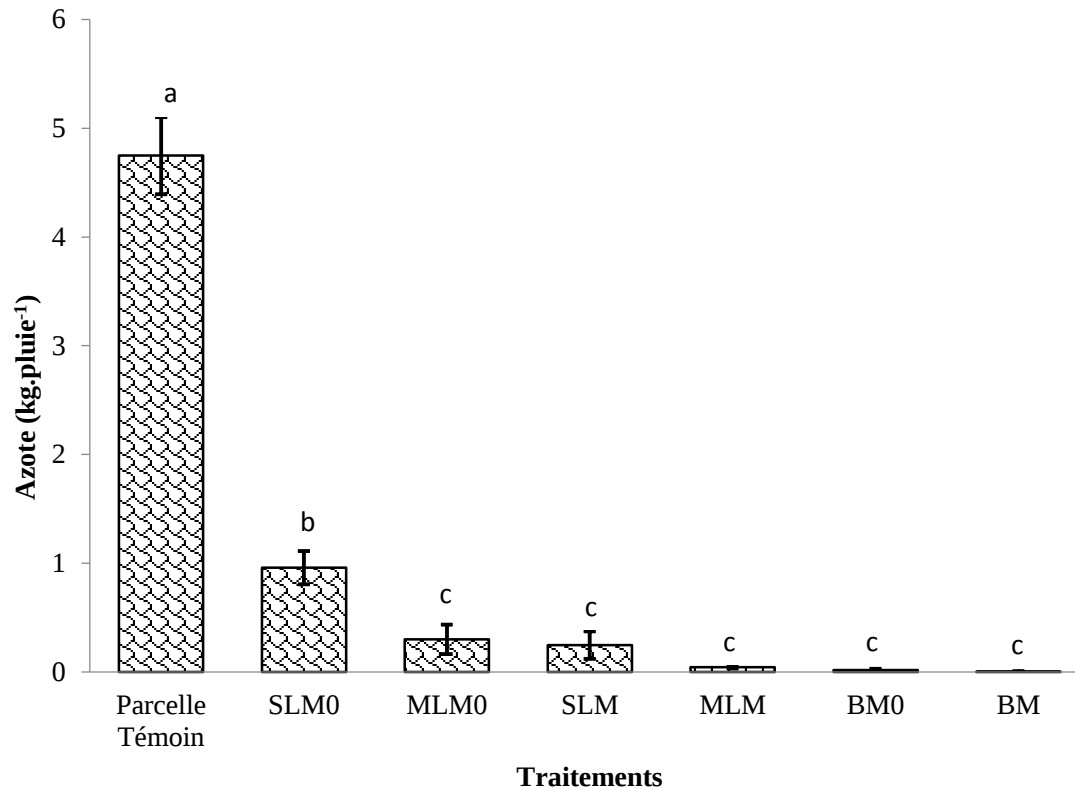
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 62: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



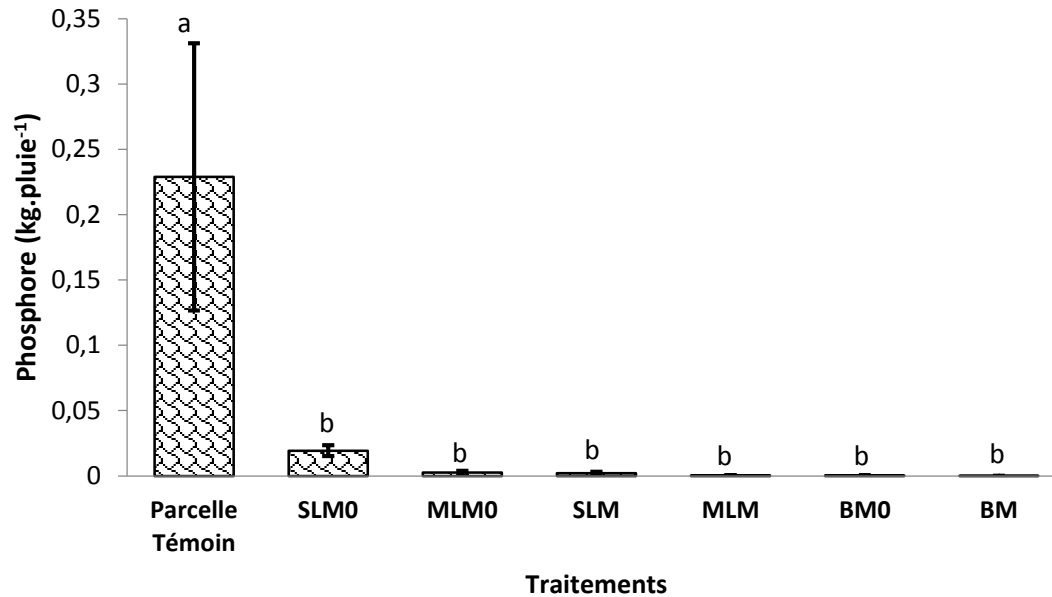
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch ; LPM0 = Labour à Plat et sans Mulch ; LPM = Labour à Plat et Mulch.

Figure 63: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Lokogba



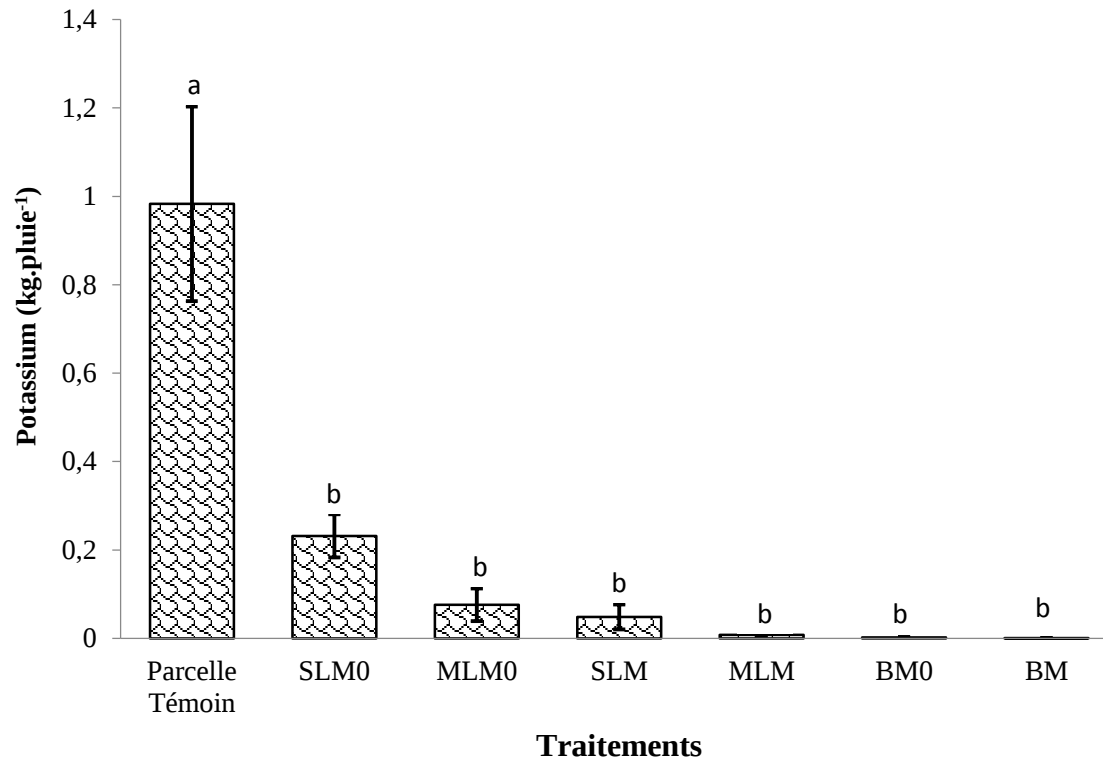
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 64: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte en Azote par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin



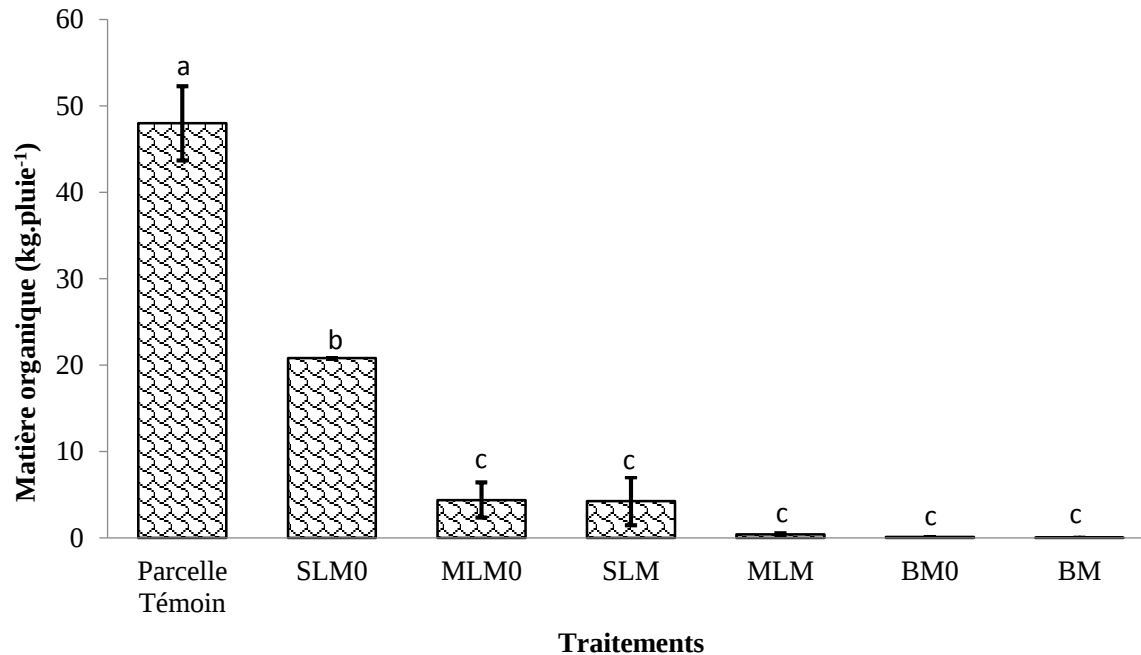
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 65: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte du Phosphore par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin



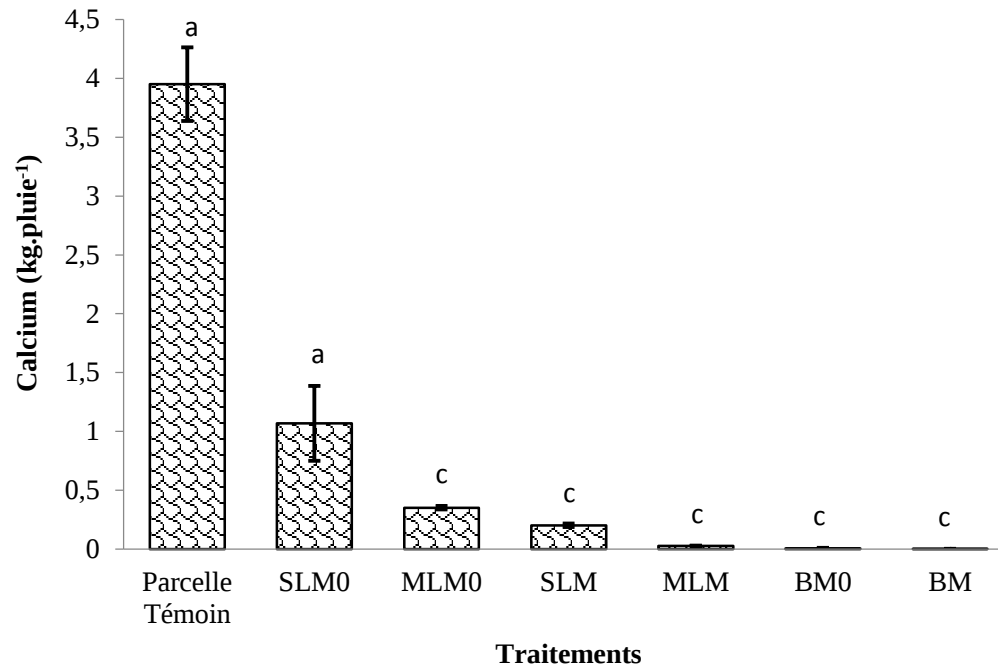
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 66: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Potassium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin



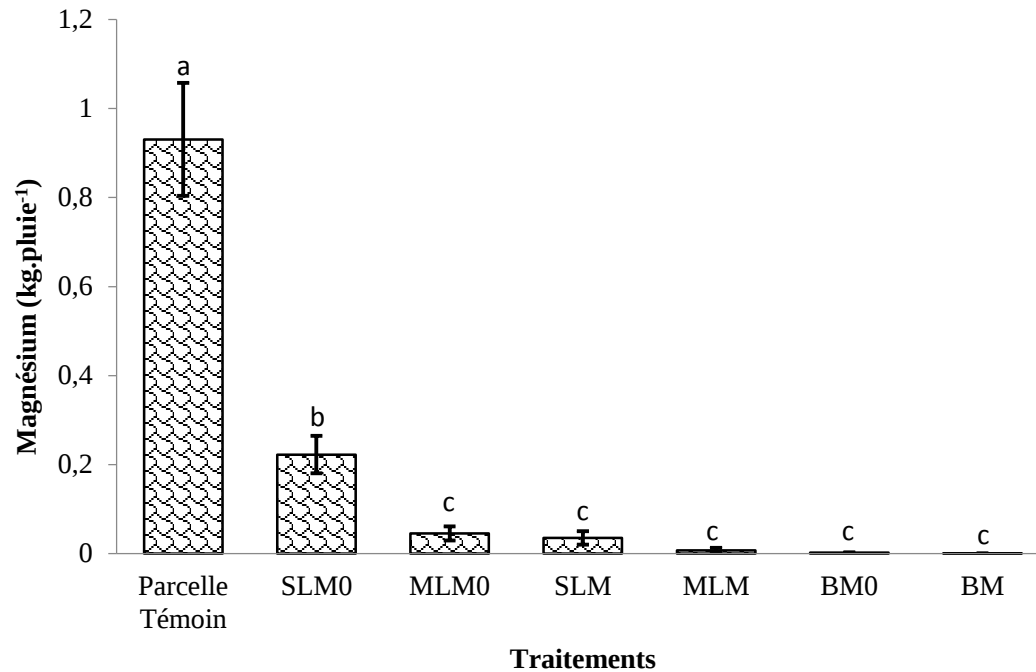
Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 67: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Matière organique par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin



Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 68: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Calcium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin



Les histogrammes portant la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5% ; SLM0 = Sans Labour et sans Mulch ; SLM = Sans Labour et Mulch ; MLM0 = Minimum Labour et sans Mulch ; MLM = Minimum Labour et Mulch ; BM0 = Billonnage perpendiculaire à la pente et sans Mulch ; BM = Billonnage perpendiculaire la pente et Mulch.

Figure 69: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la perte de Magnésium par érosion au niveau du bassin versant de Linsinlin

4-1-4- Discussion

Les pratiques culturales, surtout le travail du sol, constituent un outil de gestion important de lutte contre les risques d'érosion hydrique, la promotion de la conservation de l'eau in situ, l'amélioration et la stabilisation des rendements des cultures dans les systèmes de production pluviale des régions semi-arides et subtropicales (Kurothe et *al.*, 2014). L'eau de ruissellement a des impacts importants sur et hors site tels que la disponibilité en eau du sol, la perte des sédiments, des éléments nutritifs, et de biocides (Armand et *al.*, 2009 ; Soane et *al.*, 2012). Pour contrôler l'érosion des sols par l'eau, les eaux de ruissellement doivent être éliminées ou réduites à un débit qu'elles ne peuvent pas transporter les particules détachées du sol. Parce que l'eau perdue par ruissellement n'est d'aucune utilité pour la production agricole, le contrôle de ruissellement est également essentiel à des fins de conservation de l'eau (Unger, 1996). Les résultats de cette étude ont montré que le taux de ruissellement et de la perte de terre des parcelles témoins sont les plus élevés par rapport à ceux des autres traitements. Ces résultats sont conformes à ceux par (Woyessa et Bennie, 2004).

Le travail du sol et le mulching affectent de manière significative le ruissellement et l'érosion des sols. La présente étude a confirmé que le zéro labour peut augmenter considérablement le ruissellement par rapport au labour, au minimum labour et au billonnage. Plusieurs études ont indiqué que le semis direct avec une surface du sol compacte peut entraîner une faible capacité d'infiltration qui est sensible à des volumes élevés de ruissellement (Soane et *al.*, 2012 ; Palm et *al.*, 2014). Cependant, dans l'ensemble, nos résultats suggèrent que la compaction du sol peut ne pas être d'une grande préoccupation. L'impact du non-labour sur le ruissellement n'est pas aussi clair que l'impact sur l'érosion. Alors que l'érosion peut être réduite jusqu'à 80% voire 90% sans le labour, le ruissellement ne peut être réduit que légèrement, avec 10% de réduction (Meyer et *al.*, 1999). Rhoton et *al.* (2002) ont trouvé un faible taux de ruissellement, à la fois pour un sol limoneux d'un champ de grenadier et d'un champ viticole de Rayne, sur des parcelles sous semis direct à long terme (> 9 ans) que sur des parcelles sous labour en raison de l'amélioration des propriétés du sol, par exemple, l'augmentation de la matière organique, de la porosité, l'amélioration de la stabilité des agrégats, et la diminution de la densité apparente. Cependant, beaucoup d'études sur le ruissellement et l'érosion sur les systèmes de semis direct ont été menées peu de temps après leur mise en place (Alberts et Neibling, 1994). Les effets bénéfiques du mulching sont dus à plusieurs facteurs interdépendants, y compris les améliorations de la qualité et de la résilience du sol. Le mulching a diminué le taux de l'altération de la structure du sol en améliorant l'humidité des sols et les régimes de température (Lal, 1986), en stimulant l'activité de la faune du sol, et de diminuer le ruissellement et l'érosion des sols. Les pertes de ruissellement et de matière organique du sol enrichies de sédiments venant de sols cultivés non protégés vers les terrains en aval peuvent être élevées. Laisser des résidus de récolte sur la surface du sol réduit considérablement le ruissellement et l'érosion des sols (Rees et *al.*, 2002). Le ruissellement et l'érosion produits sur des sols sous mulching sont les plus bas de tous les

sols cultivés. Barthès et *al.* (1998) ont montré que l'érodabilité des parcelles est donc faible dans l'ensemble, surtout lorsque le sol est bien couvert (mulch, végétation importante avec engrais), les situations sans mulch ni engrais connaissant de forts ruissellements (elles sont aussi plus pauvres en carbone). La réduction des eaux de ruissellement sur le sol couvert avec des résidus de récolte résulte du taux élevé d'infiltration de l'eau et de la macroporosité. La réduction des eaux de ruissellement et de l'érosion dans les sols paillés réduit également le transport hors site des polluants de sources non ponctuelles (par exemple, engrais, pesticides, herbicides) et aux cours d'eau (Blanco-Canqui et Lal., 2008). L'effet de la couverture du sol par le mulching sur la transmission des pertes est probablement un facteur clé qui explique l'effet de réduction de l'érosion sur les pratiques de conservation du sol (Leys et *al.*, 2010). Si on compare la qualité des terres érodées et des eaux ruisselées recueillies à l'aval des parcelles d'érosion, au sol en place sur 10 cm et ceci en fonction du couvert végétal et de l'intensité des pertes par érosion, on observe selon Roose (1977) que:

- Les pertes en nutriments croissent parallèlement au volume ruisselé et érodé; les teneurs en nutriments décroissent moins vite que n'augmentent les volumes de terre et d'eau déplacés,
- On retrouve, proportionnellement, bien plus d'éléments nutritifs dans les eaux et les terres érodées que dans le sol en place (horizon: 10 cm); ceci est net pour le carbone, azote, phosphore, l'argile, les limons jusqu'à (50 microns) et encore plus flagrant pour les bases échangeables (14 à 18 fois plus sous culture); l'érosion en nappe est donc sélective vis-à-vis des nutriments et des colloïdes qui font l'essentiel de la fertilité des sols,
- La sélectivité de l'érosion en nappe est d'autant plus marquée que le volume érodé est faible, donc que l'on passe du sol nu à la culture et de la culture à la forêt.

L'érosion en nappe entraîne dans les champs un décapage du sol souvent à peine perceptible à l'échelle humaine (0,1 à 10 mm par an). Mais cette forme d'érosion est pernicieuse, car elle amoindrit le potentiel de fertilité du sol resté en place en diminuant insidieusement sa réserve en éléments nutritifs et sa capacité à retenir l'eau et les cations échangeables. En effet, l'érosion entraîne des pertes sélectives en particules fines (argile, limons et matières organiques) et en éléments fertilisants, de 1,3 à 18 fois supérieures à celles auxquelles on pourrait s'attendre s'il n'y avait qu'un décapage du sol en place (Roose, 1977).

L'érosion hydrique entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants. Elle se traduit, en amont, par des pertes en terre ainsi que des pertes en matière organique et en éléments nutritifs notamment l'azote et le phosphore (Dautrebande, 2006). Nos résultats sont similaires à ceux de Munodawafa (2007) selon lesquels le travail du sol et le mulching influence significativement la perte des éléments nutritifs du sol, surtout l'azote et le potassium. Yang et *al.* (2013) ont montré que la perte de l'azote et du potassium est élevée sur les versants contrairement au phosphore qui est souvent fixé sur les agrégats du sol. Le mulching, en réduisant significativement la perte

de terre et le ruissellement, réduit par conséquent la perte des éléments nutritifs sur les versants (Reicosky *et al.*, 1996). La matière organique est généralement associée au plus fines et réactives fractions d'argile et de limon du sol. Sa perte par érosion hydrique sur un bassin versant est donc très élevée sans l'utilisation des pratiques de conservation des sols (Munodawafa, 2012). Ces pertes de matière organique et d'éléments nutritifs constituent les principales causes de la baisse de la fertilité des sols et de la chute de rendements des cultures (Atreya *et al.*, 2005).

4-2- EFFET DES PRATIQUES DE CONSERVATION DES SOLS ET DES EAUX SUR LA PRODUCTIVITE DU MAÏS

4-2-1- Contexte

L'épuisement et la dégradation du sol sont de graves contraintes du développement agricole et contribuent ainsi à la faim et à la pauvreté en Afrique subsaharienne. Celle-ci compte une population de plus de 500 millions d'habitants (dont près de la moitié vivent avec moins de 1 dollar US par jour), qui augmente d'environ 3% par an (Roche, 2003). Depuis les années 1970, la production alimentaire dans la majeure partie de l'Afrique subsaharienne n'a pas suivi l'accroissement démographique. Une extrême fatigue des terres, le dépérissement des sols et l'accélération de la désertification en ont été les résultats désastreux (Eberlee, 2005). Ce phénomène se trouve sans cesse amplifié par la pression démographique et la quasi-disparition de la jachère naturelle des pratiques culturelles (Agbahungba et Assa, 2001). Plusieurs causes expliquent ces résultats : La pression foncière, l'intensification des cultures et la destruction du couvert végétal entraînant l'érosion des terres et l'utilisation des techniques culturelles inappropriées. En conséquence, on assiste à une chute drastique des rendements des cultures céréalières, base de l'alimentation de la population (Buckles *et al.*, 2000). L'attachement des paysans aux pratiques traditionnelles et la pauvreté constituent des obstacles à la réussite de la diffusion des techniques de gestion conservatoire de la fertilité des sols. Cela engendre la dégradation continue des sols et la baisse de la productivité agricole freinant le développement du pays (Razafindrakoto, 2007) et constituent une préoccupation majeure au Bénin.

Face à cette situation, la connaissance des sols, leur conservation et la gestion de leur fertilité en vue d'une production agricole durable sont des avantages pour les marchés intérieurs et extérieurs d'un pays comme le Bénin qui dispose des terres agricoles de bonnes potentialités avec 65 % de superficies cultivables. Il est possible, si ces potentialités sont bien exploitées, que le pays réalise pleinement son autosuffisance alimentaire et dégage d'importantes devises par un bon aménagement agricole (Agossou, 1983 ; Mitchozounou, 2011).

Plusieurs activités de recherches ont été mises en œuvre au sud du Bénin pour la conservation du sol et la gestion de leur fertilité par Azontondé (1994) ; Codjia (1996) ; Azontondé (1998) ; Houngnandan (2002) ; Kouelo (2004) ; Saidou (2005) etc. Il s'agit des techniques de rotation à base de légumineuses et de plantes fourragères (stylosanthes, jachères à base de plantes herbacées améliorantes), les plantes de couvertures telles que *Mucuna* (la culture du maïs après une courte jachère de *Mucuna*), l'agriculture en couloirs et autres systèmes de cultures à base de légumineuses, les arbres et arbustes en agroforesterie (*Acacia auriculiformis*, *Gliricidia sepium*).

Les techniques culturales recommandant le travail minimum du sol, du mulching, du semis direct sous couverture végétale permanente sont peu étudiées ou faiblement intensifiés (IFS, 2002). La présente étude a pour objectif d'évaluer l'effet du type du travail du sol et du mulching sur les paramètres de croissance et de rendements du maïs dans les trois bassins versants étudiés.

4-2-2- Méthodes

❖ Matériel végétal

Le maïs (*Zea mays L.*), variété AK 94 DMR ESR Y est la culture test de cette étude. C'est une variété composite précoce (90 j), à grains jaunes de type denté-corné. Elle est résistante à la rouille, au mildiou à la striure, à la verse et à la casse. Elle est passée par l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) avant d'être multipliée par les paysans multiplicateurs de Zè. Son rendement grain en milieux paysans varie de 2,3 à 3 t/ha (Ahoyo et al., 2013). Les semences ont été achetées au Secteur Communal du Développement Agricole (SCDA) de chaque localité.

❖ Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental mis en place pour la collecte des données est un Bloc Aléatoire Complet (Bloc de Fischer) à deux facteurs. Le premier facteur est le travail du sol. Les modalités varient suivant les pratiques paysannes de chaque site. Ainsi, deux types de travail du sol ont été étudiés sur le bassin versant de Govié (semis direct et labour à plat), quatre types de travail du sol sur le bassin versant de Lokogba (semis direct, labour à plat, minimum labour, et billonnage perpendiculaire à la pente) et trois types de travail du sol sur le bassin versant de Linsinlin (Semis direct, minimum labour et billonnage perpendiculaire à la pente). Ces types de travail du sol sont combinés avec un second facteur qui est le mulch à deux modalités (sans mulch et avec mulch à 50 % de taux de couverture du sol soit 3 t MS/ha de pailles). L'essai comporte quatre répétitions et le nombre de traitements varient selon le site. Chaque parcelle élémentaire a une superficie de 21 m² (7 m x 3 m). Le maïs est semé à la densité de 125 000 plants/ha (80 cm x 20 cm) à 2 plants par poquet. Sur le bassin versant de Govié, les opérations culturales ont été réalisées comme suit : la préparation du sol a été faite le 25 mars 2014 ; l'installation du mulch, le labour et le semis ont été fait le 27 mars 2014. Le premier sarclage a été fait trois semaines après semis et le deuxième sarclage, deux semaines après le premier. L'azote a été apporté sous forme d'urée (46% N) en trois fractions : la première, après la

levée (une semaine après semis, la deuxième après le premier sarclage et la troisième après le deuxième sarclage. La récolte est intervenue après la maturation complète des épis (Dessèchement des feuilles et des spathes). Ces opérations culturales sont identiques à celles réalisées sur les deux autres bassins versants. Cependant, les essais ont été installés plus tard à Lokogba (en avril) et à Linsinlin (en mai). Une fumure de fond uniforme de 50 kg P₂O₅ sous forme de TSP (42% P₂O₅) et de 30 kg K₂O sous forme de KCl (60% K₂O) ont été appliquée à tous les essais. Sur le bassin versant de Lokogba, l'azote n'a pas fait l'objet de facteur d'étude car selon les producteurs, cet engrais contribue à la dégradation de leur sol.

❖ Collecte des données

Pour évaluer l'effet du labour et du mulching sur la productivité du maïs, les données suivantes ont été collectées :

Détermination des paramètres de croissance des plants du maïs : La hauteur des plants du maïs a été mesurée à 15, 30, 45 et 60 jours après le semis (JAS) sur 6 plants choisis au hasard par unité expérimentale tout en excluant les deux plants de bordure et les lignes de bordure. Cette hauteur se mesure du collet à la ligule de la dernière feuille bien déployée par le plant de maïs (Danwanon, 2011). La vitesse de croissance des plants en cm/jour a été déterminée à partir de la courbe d'évolution des hauteurs des plants. La pente de cette courbe est la vitesse de croissance des plants (Tossou, 2013). La longueur et la largeur de la feuille florale ont été mesurées à la fin de la floraison mâle sur 6 plants choisis au hasard par unité expérimentale. La méthode développée par Bonhomme (1992) et qui consiste à multiplier l'aire de la surface de la feuille foliaire par un coefficient de stabilité de forme qui est de 0,725 a permis de calculer la surface florale des plants du maïs. Le diamètre au collet des plants du maïs mesuré sur 6 plants choisis au hasard par unité expérimentale.

Le rendement du maïs : Le rendement du maïs a quatre composantes : les pailles, les spathes, la rafle et les grains. Tous les plants de maïs à l'intérieur d'une surface utile de 6 m² ont été coupés à ras le sol à la récolte. Les épis ont été enlevés, la paille pesée à l'aide d'une balance mécanique et échantillonnée. Les épis ont été despathés, les spathes pesés et échantillonnés. Les épis despathés ont été égrenés après séchage, les grains et les rafles ont été pesés et échantillonnés. Les échantillons ont été pesés à l'aide d'une balance électronique à piles. Tous les échantillons ont été séché à l'étuve au laboratoire de Microbiologie des Sols et d'Ecologie Microbienne pendant 72 heures à 65°C puis pesés pour la détermination de la matière sèche. Les rendements en pailles, spathes, grains et rafles ont été calculés à travers la formule suivante :

$$R = \frac{TMS_i \times PT_i}{ASU}$$

avec TMS_i : le taux de matière sèche de la composante i (Poids sec échantillon / Poids frais échantillon) ; PT_i : le poids total de la composante i récoltée sur surface utile et ASU : l'Aire de la surface utile exprimée en hectare.

L'indice de récolte, qui renseigne sur la répartition des assimilats entre le grain et la paille, est calculé à partir de l'équation suivante :

$$IR (\%) = (\text{Rendement grain} / \text{Rendement total}) \times 100.$$

L'accumulation de l'azote : La teneur en azote des grains, rafles, spathes et paille du maïs a été déterminée par la méthode Kjeldahl. Les résultats d'analyse obtenus ont permis de calculer l'accumulation en azote (Rendement en azote) du maïs de la façon suivante : $R_N = \%N \times R$ avec R_N = Accumulation en azote ; $\%N$ = Teneur en azote ; R = Rendement (Grains, Spathes, Rafles, Paille) du maïs.

❖ Analyse statistique des données

La saisie des données et la construction des graphes ont été faites avec Excel version 2013. L'analyse de la variance à trois facteurs pour les données de Govié et de Linsinlin et à deux facteurs pour les données de Lokogba. Elle est suivie de la comparaison des moyennes avec la Plus Petite Différence Significative (PPDS) et la régression multiple des résultats ont été effectuées avec le logiciel SAS version 9.2.

4-2-3- Résultats

La présente étude a été réalisée en 2013 et reprise en 2014. Cependant, les essais de l'année 2013 ont généré des résultats très médiocres confirmant le niveau de dégradation du sol. Sur plusieurs parcelles expérimentales, la récolte n'a pas pu être faite. La biomasse produite a été donc utilisée comme mulch pour la reprise des essais. Pour cette raison, seuls les résultats de la deuxième année ont été présentés.

4-2-3-1- Bassin versant de Govié

❖ Croissance des plants du maïs

Le travail du sol influence significativement la vitesse de croissance et la surface foliaire des plants du maïs (Tableau 1 Annexe). Le mulching et l'azote ont chacun un effet significatif sur tous les paramètres de croissance excepté le nombre de feuilles par plant. Par contre la combinaison de ces facteurs n'a aucun effet significatif sur les paramètres de croissance du maïs.

En effet, le travail du sol a amélioré de façon significative la vitesse de croissance des plants de 2,9 cm/j (sans labour) à 3,15 cm/j et la surface foliaire de 47,74 cm² (sans labour) à 62,97 cm². Le mulching a amélioré la vitesse de croissance de 2,9 à 3,14 cm/j, le diamètre au collet de 1,28 à 1,37 cm et la surface foliaire de 45,85 à 65,26 cm². Il en est de même pour l'azote qui a amélioré la vitesse de croissance de 2,5 à 3,24 cm/j, le diamètre au collet de 1,25 à 1,40 cm et la surface foliaire de 41,07 à 69,64 cm² (Tableau 28). La combinaison des effets de ces trois facteurs n'a aucune influence significative sur la croissance des plants du maïs. Toutefois, le labour à plat combiné au mulch et à l'azote génère les meilleurs paramètres de croissance des plants du maïs, 3,57 cm/j de croissance, 1,41 cm de diamètre au collet et 87,83 cm² de surface foliaire (Tableau 29).

Tableau 28: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les paramètres de croissance des plants du maïs.

Facteurs	Modalités	Vitesse de croissance (cm/j)	Diamètre au collet (cm)	Surface foliaire (cm ²)	Nombre de feuilles
Travail de sol	Sans labour	2,90 ± 0,067b	1,31 ± 0,042a	47,74 ± 5,41b	10,00 ± 0,28a
	Labour	3,15 ± 0,08a	1,33 ± 0,029a	62,97 ± 5,45a	10,16 ± 0,29a
	ppds	0,1173	ns	9,1555	ns
Mulching	Sans Mulch	2,90 ± 0,067b	1,28 ± 0,04b	45,45 ± 4,14b	10,05 ± 0,24a
	Mulch	3,143 ± 0,08a	1,37 ± 0,03a	65,26 ± 6,04a	10,11 ± 0,33a
	ppds	0,1173	0,085	9,1555	ns
Azote	Sans azote	2,80 ± 0,05b	1,25 ± 0,035b	41,07 ± 3,86b	10,20 ± 0,25a
	Avec Azote	3,24 ± 0,07a	1,40 ± 0,024a	69,64 ± 4,96a	9,95 ± 0,32a
	ppds	0,1173	0,085	9,1555	ns

ppds = plus petite différence significative ; ns = non significatif ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

Tableau 29: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la croissance des plants du maïs.

Travail de sol	Mulching	Azote	Vitesse de croissance (cm/j)	Diamètre au collet (cm)	Surface foliaire (cm ²)	Nombre de feuilles
Sans labour	Sans mulch	N0	2,56 ± 0,07	1,14 ± 0,09	27,84 ± 2,02	10,38 ± 0,47
		N120	3,06 ± 0,03	1,34 ± 0,054	50,08 ± 6,50	9,56 ± 0,37
	Mulch	N0	2,81 ± 0,02	1,30 ± 0,05	34,70 ± 2,40	10,38 ± 0,51
		N120	3,16 ± 0,11	9,69 ± 0,87	78,34 ± 5,58	1,47 ± 0,052
Labour	Sans mulch	N0	2,81 ± 0,06	1,25 ± 0,05	41,57 ± 6,87	9,63 ± 0,69
		N120	3,19 ± 0,05	1,39 ± 0,05	62,32 ± 6,26	10,63 ± 0,22
	Mulch	N0	3,04 ± 0,077	1,29 ± 0,08	60,17 ± 6,84	10,44 ± 0,37
		N120	3,57 ± 0,14	1,41 ± 0,031	87,83 ± 9,93	9,94 ± 0,93

N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée. Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

❖ Rendements du maïs

Quatre composantes de rendement du maïs ont été évaluées sous l'effet du travail du sol, du mulching et de l'azote. Le travail du sol a un effet significatif au seuil de 5% sur les rendements grains, rafles, spathes et biomasse. Le mulching a un effet significatif au seuil de 5% sur les rendements grains, rafles et biomasse. Quant à l'azote, son effet est significatif au seuil de 5% sur les rendements grains, rafles et spathes. L'effet sur l'indice de récolte n'est significatif qu'au niveau de de l'azote au seuil de 5% (Tableau 2 Annexe).

Le travail du sol a amélioré les rendements grains, rafles, spathes et biomasse du maïs de façon significative, de 1030 kg MS/ha à 1447 kg MS/ha, de 204 à 279 kg MS/ha, de 197 à 253 kg MS/ha et de 1208 à 1618 kg MS/ha respectivement. Il en est de même pour le mulching et l'azote. Ce dernier a amélioré significativement l'indice de récolte de 35,6 à 42,4% (Tableau 30).

La combinaison des facteurs étudiés (travail du sol, mulching et azote) n'a aucun effet significatif sur les composantes du rendement du maïs. Toutefois, le labour à plat combiné avec le mulching et l'azote a généré les meilleurs rendements du maïs (2263 kg MS/ha de grains, 438 kg MS/ha de rafles, 345 kg MS/ha de spathes, 1917 kg MS/ha de biomasse et 45,63% d'indice de récolte (Figures 70 ; 71 et 72).

Tableau 30: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la productivité du maïs.

Paramètres	Modalités	Rendement Grains (kg MS/ha)	Rendement Rafles (kg MS/ha)	Rendement Spathes (kg MS/ha)	Rendement Biomasse (kg MS/ha)	Indice de récolte (%)
Labour	Sans labour	1030,16 ± 117,26b	204,25 ± 20,33b	197,27 ± 17,06b	1208 ± 105,50b	38,23 ± 1,77a
	Labour	1447,1 ± 142,86a	279,06 ± 25,99a	253,58 ± 24,54a	1617,96 ± 112,35a	39,76 ± 1,53a
	ppds	229,89	42,11	52,11	300,72	ns
Mulching	Sans Mulch	1006,01 ± 93,06b	198,06 ± 14,92b	204,66 ± 21,43a	1242,95 ± 106,07b	37,66 ± 1,78a
	Mulch	1471,25 ± 155,17a	285,25 ± 285,18a	246,19 ± 21,96a	1583,01 ± 119,37a	40,32 ± 1,47a
	ppds	229,89	42,11	ns	300,72	ns
Azote	N0	908,47 ± 62,94b	189,07 ± 13,03b	179,48 ± 18,67b	1295,63 ± 120,63a	35,60 ± 1,42b
	N120	1568,78 ± 146,48a	294,24 ± 27,15a	271,37 ± 19,21a	1530,32 ± 113,88a	42,39 ± 1,42a
	ppds	229,89	42,11	52,11	300,72	4,39

N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée. ppds = plus petite différence significative au seuil de 5%. Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

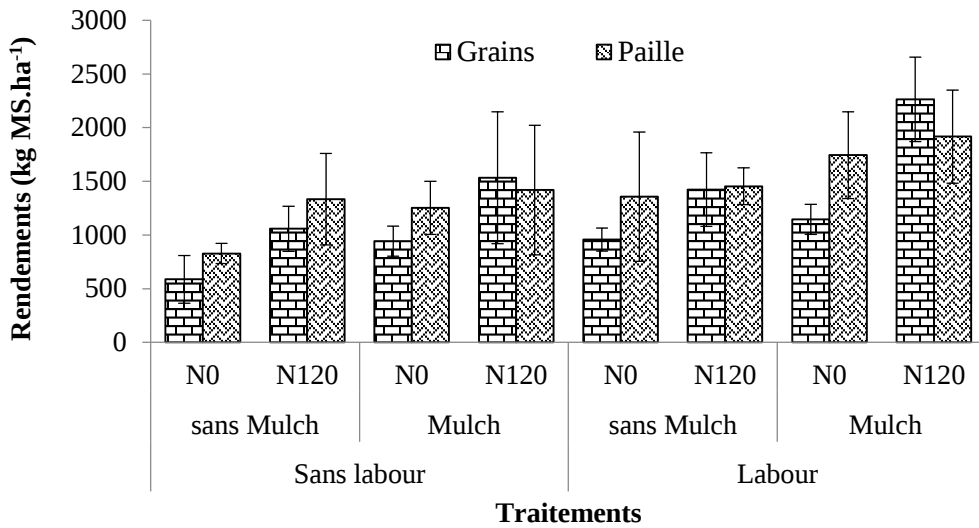


Figure 70: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements grains et paille du maïs.

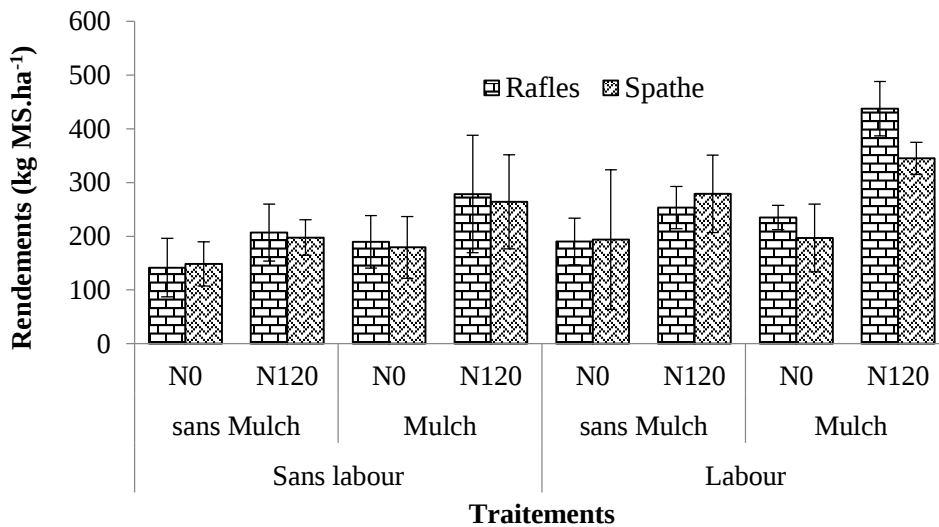


Figure 71: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements rafles et spathes du maïs.

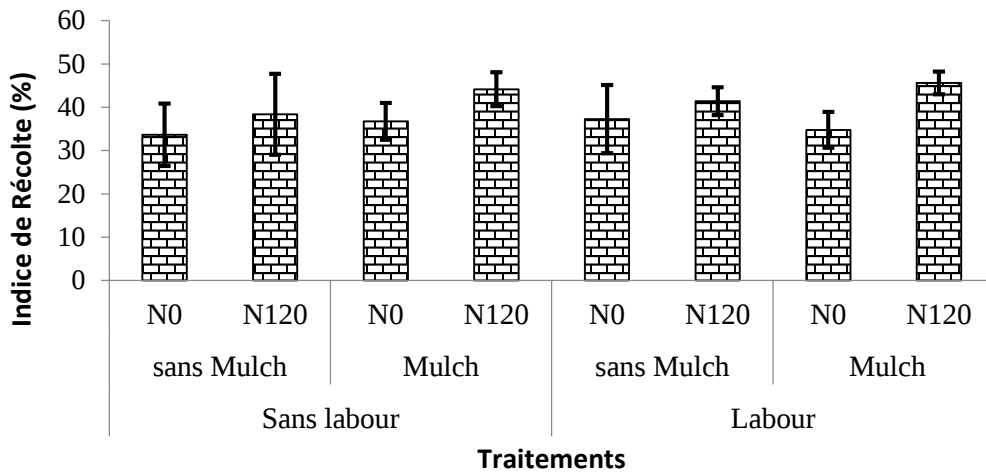


Figure 72: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'indice de récolte du maïs.

❖ Accumulation de l'azote dans les parties aériennes de la plante

Le travail du sol, le mulching et l'azote ont chacun un effet significatif au seuil de 5% sur l'accumulation en azote de toutes les composantes du rendement du maïs (Tableau 3 Annexe). L'accumulation en azote a été améliorée par le labour de 13,9 à 20,2 kg N/ha dans les grains, de 1,4 à 2,2 kg N/ha dans les rafles, de 1,5 à 2,1 kg N/ha dans les spathes et de 13,2 à 19,0 kg N/ha dans la biomasse. Les résultats sont pareils pour le mulching et naturellement pour l'azote (Tableau 31).

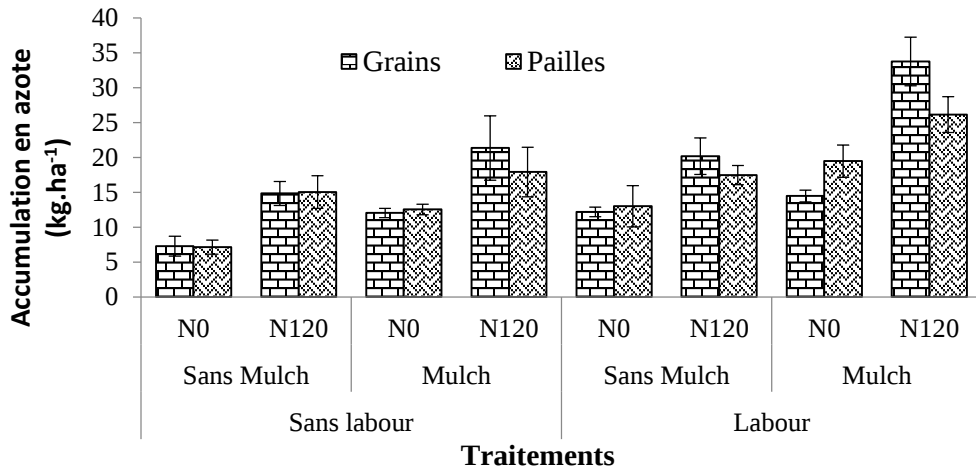
Tableau 31: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote du maïs.

Facteurs	Modalités	Azote grains (kg/ha)	Azote Raffles (kg/ha)	Azote Spathes (kg/ha)	Azote Biomasse (kg/ha)	Taux d'azote grains (%)
Labour	Sans labour	13,89 ± 1,75b	1,39 ± 0,19b	1,50 ± 0,16b	13,16 ± 1,43b	45,84 ± 1,58a
	Labour	20,16 ± 2,39a	2,19 ± 0,34a	2,05 ± 0,23a	19,02 ± 1,62a	45,86 ± 1,64a
	ppds	3,5443	0,4378	0,3874	3,3629	ns
Mulching	Sans Mulch	13,64 ± 1,44b	1,28 ± 0,14b	1,50 ± 0,17b	13,17 ± 1,35b	46,03 ± 1,74a
	Mulch	20,41 ± 2,55a	2,31 ± 0,34a	2,05 ± 0,22a	19,02 ± 1,68a	45,67 ± 1,47a
	ppds	3,5443	0,4378	0,3874	3,3629	ns
Azote	N0	11,50 ± 0,80b	1,16 ± 0,12b	1,27 ± 0,14b	13,05 ± 1,43b	43,61 ± 1,51a
	N120	22,54 ± 2,32a	2,42 ± 0,32a	2,29 ± 0,18a	19,14 ± 1,58a	48,09 ± 1,50a
	ppds	3,5443	0,4378	0,3874	3,3629	ns

N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée. ppds = plus petite différence significative au seuil de 5%.

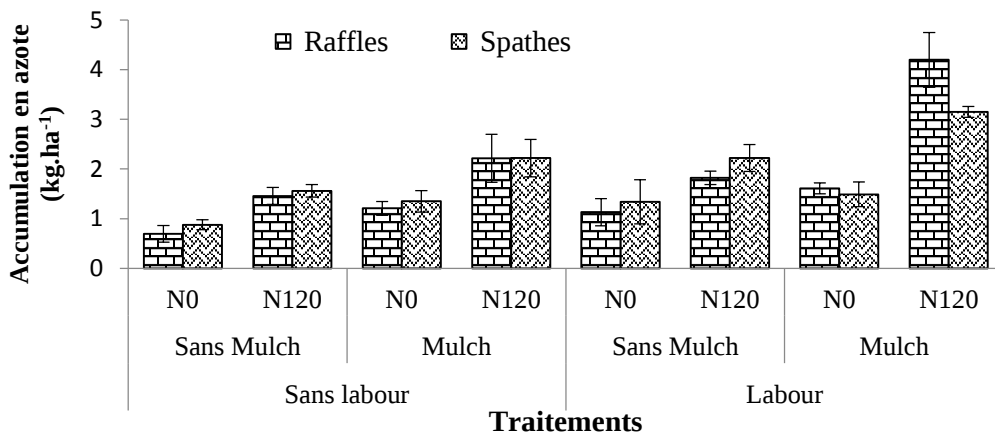
Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs accompagnées de la même lettre ne sont pas significativement différente au seuil de 5%.

En dehors de l'interaction entre le mulching et l'azote qui a un effet significatif sur l'accumulation en azote dans les rafles, l'effet n'est nullement significatif pour les autres combinaisons (Figures 73 et 74). La répartition de l'azote dans la plante (partie aérienne) a été évaluée. En effet, les traitements influencent la répartition de l'azote dans les organes aériens de la plante. La paille et les grains comportent la plupart de l'azote de la plante. Lorsque l'azote est apporté à la plante, les grains accumulent plus d'azote que tous les autres organes aériens de la plante et dans le cas contraire, la paille en accumule plus (Figure 75). On pourrait donc penser que la fertilisation azotée affecte surtout la teneur en azote des grains du maïs.



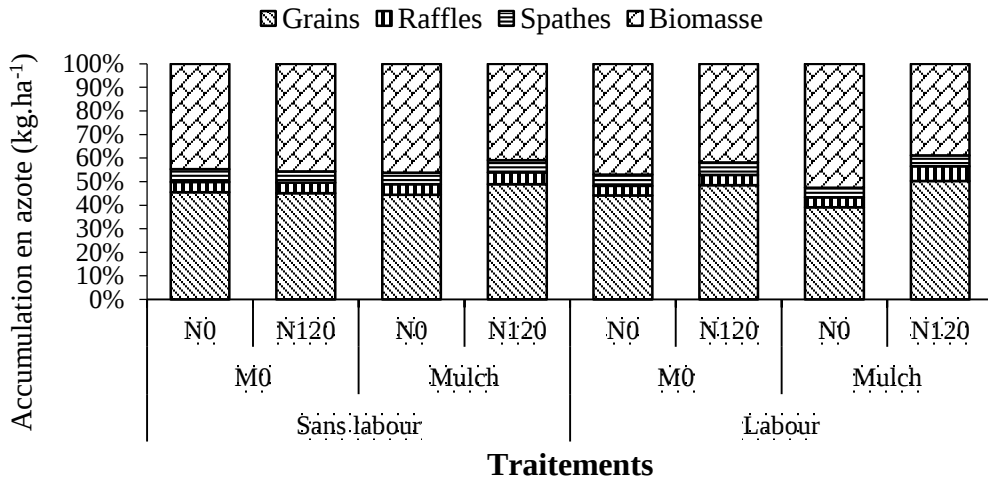
N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 73: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs.



N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 74: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des rafles et des spathe du maïs.



N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 75: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des composantes du rendement de maïs.

4-2-3-2- Bassin versant de Lokogba

❖ Croissance des plants du maïs

L'étude des facteurs simples et de leurs interactions sur la vitesse de croissance et l'indice foliaire du maïs indique une différence significative entre les différents facteurs et leurs combinaisons au seuil de 5% (Tableau 4 Annexe). Le diamètre au collet et le nombre de feuilles par plant n'indiquent aucune différence significative entre les facteurs étudiés et leurs interactions. Les rendements grains, rafles et spathes indiquent une différence significative entre les facteurs étudiés pris isolément au seuil de 5%. Le travail du sol a un effet significatif sur le rendement en paille du maïs, mais n'a aucun effet significatif sur l'indice de récolte. Le mulching a un effet significatif sur l'indice de récolte, mais n'a aucun effet significatif sur le rendement en paille du maïs. La combinaison des deux facteurs n'a aucun effet significatif sur les composantes du rendement du maïs. Le travail du sol et le mulching n'ont pas un effet significatif sur le diamètre au collet et le nombre de feuilles des plants du maïs. Toutefois, on note une différence arithmétique entre les traitements. Le billonnage a généré le diamètre au collet des plants le plus faible (1,28 cm) alors que le labour à plat donne le diamètre le plus élevé (1,37 cm). Le diamètre au collet des plants du maïs est également de 1,37 cm sur les parcelles couvertes de mulch contre 1,28 cm sur les parcelles sans mulch. Quel que soit le type de travail du sol et de la dose de mulching, un plant de maïs porte environ 12 feuilles, 30 jours après semis. La combinaison du travail de sol et du mulching a donné des résultats similaires sur le diamètre au collet des plants et le nombre de feuilles par plant de maïs. Le travail du sol et le mulching ont un effet significatif sur l'indice foliaire et la vitesse de croissance des plants de maïs. Le semis direct a généré la vitesse de

croissance et l'indice foliaire les plus faibles (2,66 cm/j et 65,81 cm² respectivement). La vitesse de croissance et l'indice foliaire les plus élevés (3,62 cm/j et 120 cm² respectivement) ont été obtenus avec le billonnage suivi du labour à plat (Tableau 32). Le mulching a amélioré de façon significative la vitesse de croissance des plants de maïs de 2,91 cm/j à 3,75cm/j et l'indice foliaire de 73,05 cm² à 114,02 cm². L'interaction entre le travail du sol et le mulching a un effet significatif sur la vitesse de croissance et l'indice foliaire des plants du maïs. Le semis direct sans couverture végétale a la vitesse de croissance et l'indice foliaire les plus faibles (2,04 cm/j et 42,11 cm² respectivement). Les paramètres de croissance les plus élevés ont été obtenus au niveau du billonnage avec couverture végétale (3,86 cm/j et 134,15 cm² respectivement, Tableau 33). Cependant, la combinaison du travail de sol et du mulching n'a aucun effet significatif sur le diamètre au collet des plants et le nombre de feuilles par plant (Figure 76 et 77)

Tableau 32 : Effet du travail du sol et du mulching sur la croissance des plants de maïs.

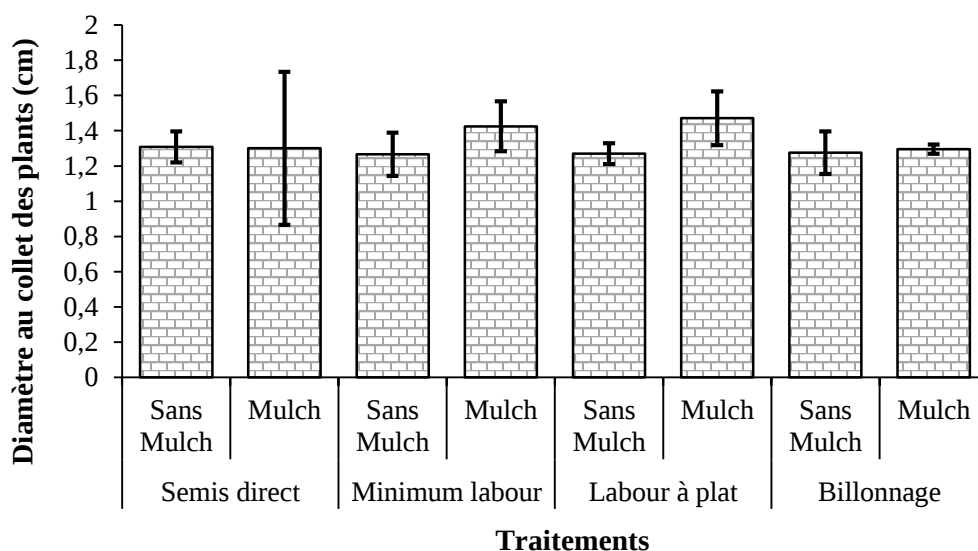
Facteur d'étude	Modalités	Diamètre au collet (cm)	Nombre de Feuilles	Indice Foliaire (cm ²)	Vitesse de Croissance (cm/j)
Travail du sol	Billonnage	1,28 ± 0,03	12,21 ± 0,20	120,00 ± 6,49 ^a	3,62 ± 0,11 ^a
	Labour à plat	1,37 ± 0,06	11,67 ± 0,33	97,57 ± 12,51 ^b	3,51 ± 0,26 ^a
	Mini labour	1,35 ± 0,06	12,21 ± 0,06	90,75 ± 8,30 ^b	3,52 ± 0,16 ^a
	Semis direct	1,30 ± 0,11	12,00 ± 0,36	65,81 ± 11,03 ^c	2,66 ± 0,29 ^b
	ppds	ns	ns	9,2393	0,2891
Mulching	Sans Mulch	1,28 ± 0,02	11,94 ± 0,18	73,05 ± 7,25 ^b	2,91 ± 0,17 ^b
	Mulch	1,3 ± 0,06	12,10 ± 0,20	114,02 ± 5,24 ^a	3,75 ± 0,09 ^a
	ppds	ns	ns	6,5332	0,2044

Mini labour Minimum labour ; ns : non significatif ; ppds : plus petite différence significative ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

Tableau 33 : Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'indice foliaire et la vitesse de croissance des plants de maïs.

Labour	Mulching	Indice Foliaire (cm ²)	Vitesse de Croissance (cm/j)
Semis Direct	Sans Mulch	42,11 ± 6,66 ^e	2,04 ± 0,18 ^d
	Mulch	89,52 ± 1,60 ^c	3,24 ± 0,06 ^{bc}
Minimum Labour	Sans Mulch	74,21 ± 7,67 ^d	3,24 ± 0,20 ^{bc}
	Mulch	107,29 ± 3,47 ^b	3,80 ± 0,09 ^a
Labour à Plat	Sans Mulch	70,02 ± 4,75 ^d	2,97 ± 0,18 ^c
	Mulch	125,11 ± 1,17 ^a	4,05 ± 0,15 ^a
Billonnage	Sans Mulch	105,85 ± 3,08 ^b	3,39 ± 0,04 ^b
	Mulch	134,15 ± 0,89 ^a	3,86 ± 0,08 ^a
ppds		13,066	0,4088

ppds : plus petite différence significative ; Dans la même colonne, les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

**Figure 76** : Effet combiné du travail du sol et du mulching sur le diamètre au collet des plants de maïs

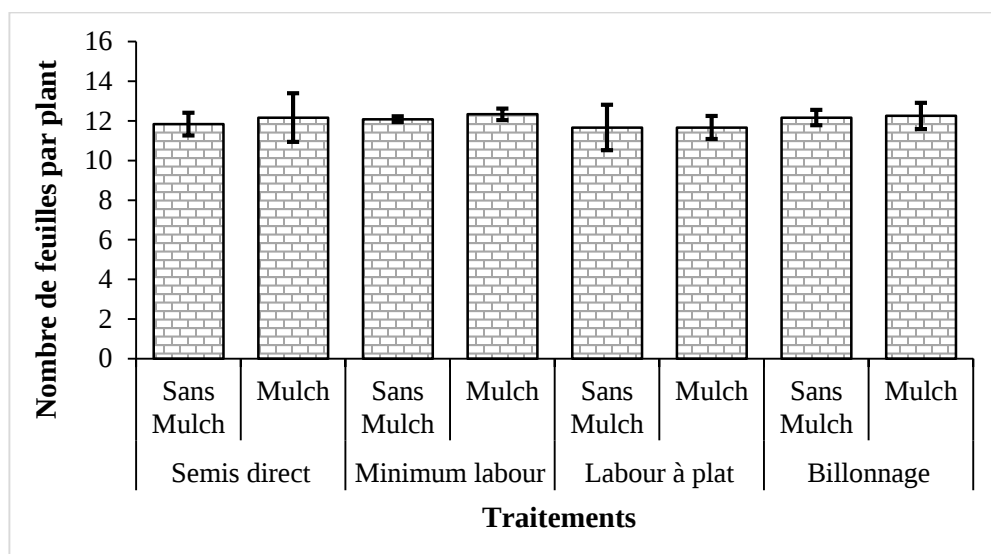


Figure 77 : Effet combiné du travail de sol et du mulching sur le nombre de feuilles par plants du maïs

❖ Rendements du maïs

Le travail du sol a amélioré de façon significative la productivité de grains du maïs de 798 kg MS/ha à 2175 kg MS/ha, de rafles de 209 à 449 kg MS/ha, de spathes de 261 à 538 kg MS/ha et de pailles de maïs de 912 à 2475 kg MS/ha. Les performances les plus faibles sont obtenus avec le semis direct alors que le billonnage génère les paramètres de rendement les plus élevés. Le mulching a aussi amélioré significativement la productivité du maïs (Tableau 5 Annexe). Le rendement en grains du maïs a augmenté de 1020 kg MS/ha à 2138 kg MS/ha. Le rendement en pailles du maïs s'est amélioré de 1677 à 2065 kg MS/ha, mais cette augmentation n'est pas significative. L'indice de récolte s'est amélioré significativement sous l'effet du travail du sol, de 31% pour le minimum labour à 40% pour le labour à plat. Le semis direct a généré un indice de récolte de 35%. Le mulching a un effet positif et significatif sur l'indice de récolte en l'améliorant de 31% à 41% (Tableau 34).

Tableau 34 : Effet du travail du sol et du mulching sur les paramètres de rendement du maïs.

Facteurs d'étude	Modalités	Rendement Grains (kg MS/ha)	Rendement Rafles (kg MS/ha)	Rendement Spathes (kg MS/ha)	Rendement Paille (kg MS/ha)	Indice de Récolte (%)
Travail du sol	Billonnage	2175,4 ± 366,1 ^a	448,8 ± 97,9 ^{ab}	538,1 ± 52,3 ^a	2475,4 ± 454,2 ^a	38,4 ± 2,1 ^{ab}
	Labour plat	2126,8 ± 305,7 ^a	471,3 ± 97,9 ^a	600,5 ± 81,9 ^a	2105,8 ± 370,4 ^a	40,4 ± 3,4 ^a
	Mini Labour	1217,4 ± 239,2 ^b	269,9 ± 46,2 ^{bc}	347,4 ± 83,3 ^b	1990,1 ± 171,7 ^a	30,8 ± 3,2 ^b
	Semis direct	797,8 ± 226,1 ^b	208,81 ± 47,2 ^c	261,5 ± 59,8 ^b	911,8 ± 160,6 ^b	34,8 ± 4,7 ^{ab}
	Ppds	481,39	190,12	140,86	986,33	8,4878
Mulching	Sans Mulch	1020,5 ± 167,0 ^b	239,6 ± 36,6 ^b	312,2 ± 50,0 ^b	1676,8 ± 257,6	31,1 ± 2,8 ^b
	Mulch	2138,1 ± 234,8 ^a	459,8 ± 64,1 ^a	561,5 ± 51,5 ^a	2064,7 ± 281,1	41,1 ± 1,0 ^a
	ppds	340,39	134,44	99,606	ns	6,0018

ppds : plus petite différence significative ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs qui sont suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

La combinaison du mulching et du travail du sol n'a eu aucun effet significatif sur la productivité du maïs. Le rendement en grains le plus élevé (2606 kg MS/ha) est obtenu au niveau du labour à plat avec couverture du mulch contre 519 kg MS/ha au niveau du semis direct sans couverture de mulch (Figure 78). Il en est de même pour le rendement en pailles dont le plus élevé est de 4940 kg MS/ha et le plus faible, 1527 kg MS/ha pour les mêmes traitements. Le minimum labour combiné au mulch a donné les rendements en rafles et en spathes les plus élevés, 207 kg MS/ha et 566 kg MS/ha respectivement (Figure 79). Ces facteurs d'études, en interaction, n'ont pas influencé significativement l'indice de récolte du maïs (Figure 80). Cet indice varie de 25% (minimum labour sans mulch) à 43% (labour à plat sous mulch).

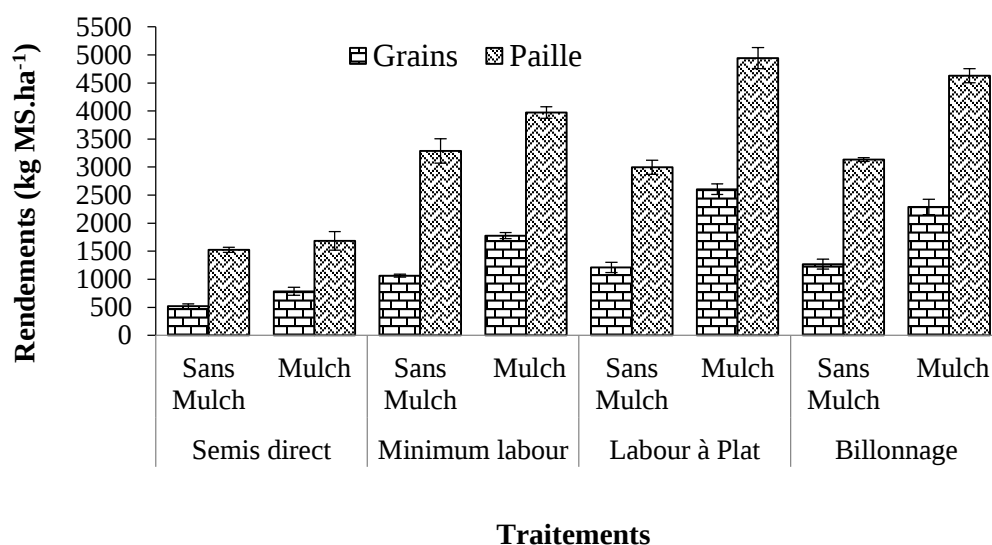


Figure 78 : Effet combiné du travail du sol et du mulching sur les rendements grains et pailles du maïs

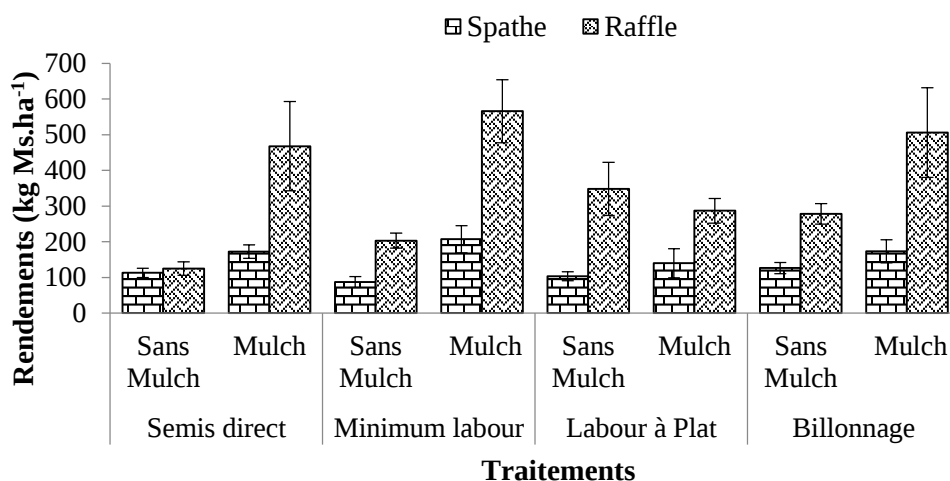


Figure 79 : Effet combiné du travail du sol et du mulching sur les rendements rafles et spathes du maïs

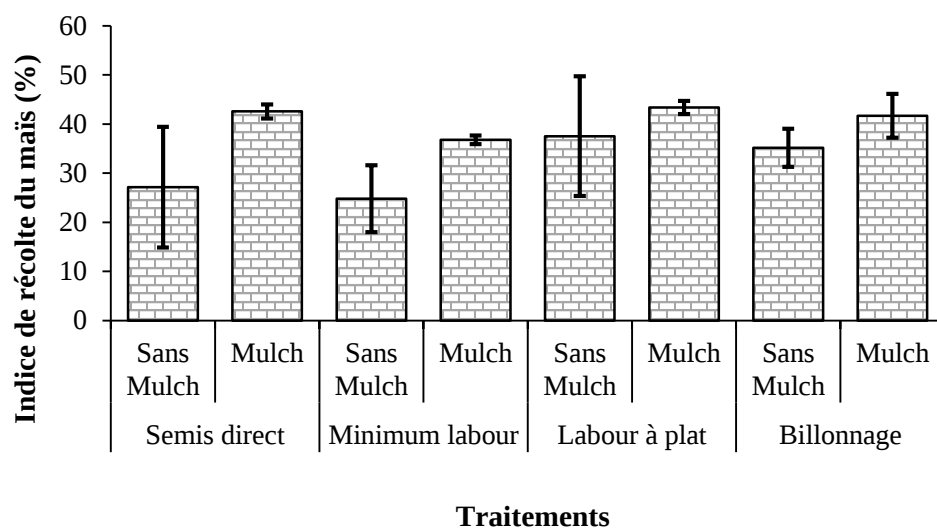


Figure 80 : Effet combiné du travail de sol et du mulching sur l'indice de récolte du maïs

❖ Accumulation de l'azote dans les parties aériennes de la plante

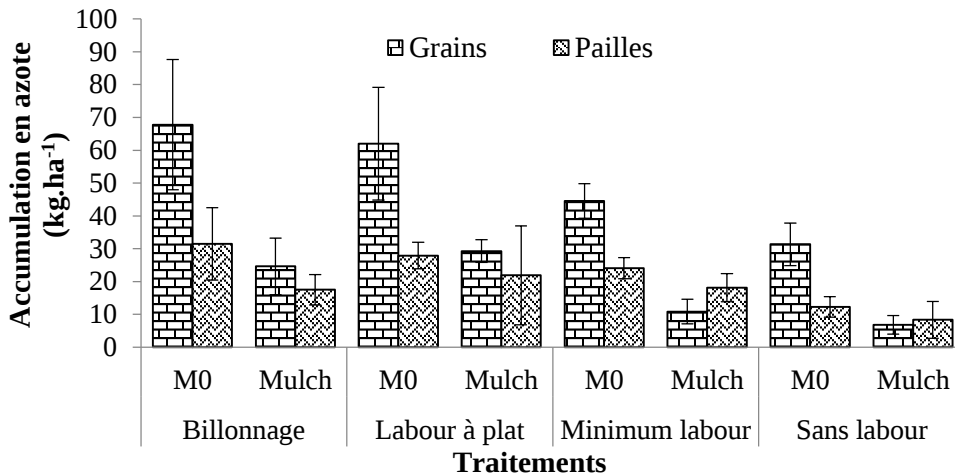
Le travail du sol et le mulching ont un effet significatif sur l'accumulation en azote de toutes les composantes du rendement du maïs. Mais par contre, l'effet est non significatif lorsqu'ils sont combinés. Le labour à plat ou le billonnage a amélioré le rendement en azote des grains de 19 à 46 kg MS.ha⁻¹, des rafles de 1,8 à 3,8 kg MS.ha⁻¹, des spathes de 2,3 à 4,6 kg MS.ha⁻¹ et de la biomasse de 10,3 à 24,9 kg MS.ha⁻¹. Le mulching a amélioré au tant le rendement en azote des composantes de rendement de maïs (Tableau 35).

Tableau 35: Effet du travail de sol et du mulching sur le rendement en azote des composantes de rendement du maïs.

Facteurs	Modalités	Azote grains (kg/ha)	Azote Raffles (kg/ha)	Azote Spathes (kg/ha)	Azote Biomasse (kg/ha)	Taux d'azote grains (%)
Travail du sol	SL	19.09 ± 5.79b	1.76 ± 0.47c	2.35 ± 0.59b	10.29 ± 1.87b	57.28 ± 4.64a
	B	46.22 ± 11.15a	3.57 ± 0.81ab	3.90 ± 0.54a	24.51 ± 4.39a	56.83 ± 3.04a
	LP	45.63 ± 8.60a	3.84 ± 1.01a	4.62 ± 0.80a	24.90 ± 4.24a	53.23 ± 7.19a
	ML	27.72 ± 7.72b	2.12 ± 0.44bc	2.73 ± 0.69b	21.09 ± 1.92a	46.84 ± 6.42a
	ppds	12,737	1,6473	0,9996	9,2367	ns
Mulching	M0	17.89 ± 3.09b	1.68 ± 0.25b	2.092 ± 0.31b	16.47 ± 2.60b	45.93 ± 4.45b
	Mulch	51.44 ± 5.51a	3.97 ± 0.57a	4.71 ± 0.38a	23.93 ± 2.68a	61.16 ± 0.99a
	ppds	9,0067	1,1648	0,7069	6,5313	9,7626

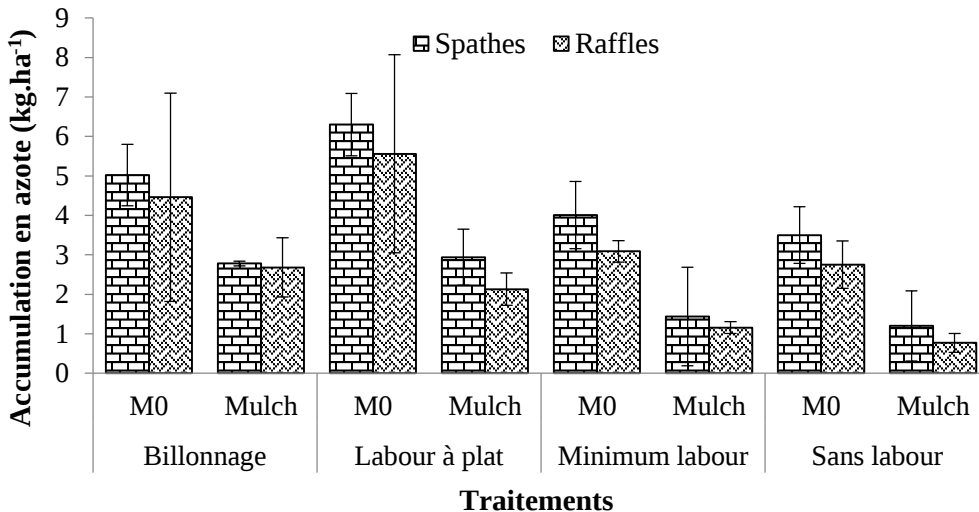
SL = Sans labour ; B = Billonnage ; LP = Labour à plat ; ML = Minimum labour ; M0 = Sans mulch ; ppds = plus petite différence significative ; ns = non significatif ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

La combinaison des facteurs améliore aussi l'accumulation de l'azote dans les composantes de rendement du maïs même si cette amélioration n'est pas significative (Figures 81 et 82). Dans cette combinaison, les différents types de travail du sol sans mulch ont un rendement en azote plus élevé dans les organes aériens du maïs. Avec mulch, le rendement en azote est plus faible. L'azote de la plante est beaucoup plus orienté vers les grains du maïs par rapport aux autres organes de la plante (Figure 83). Mais avec le mulch, l'azote est plus orienté vers la biomasse.



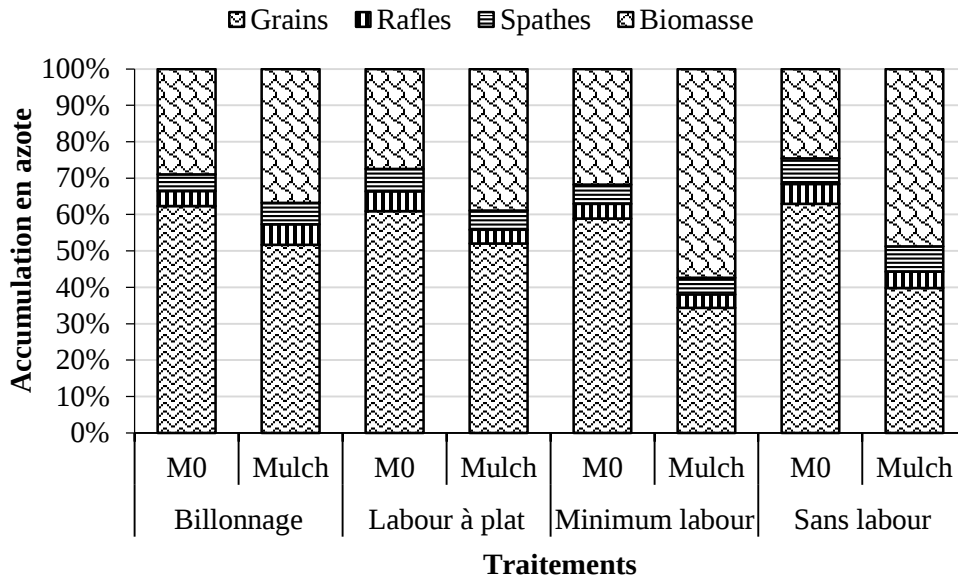
M0 = Sans labour

Figure 81: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs.



M0 = Sans labour

Figure 82: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur l'accumulation en azote des rafles et des spathes du maïs.



M0 = Sans labour

Figure 83: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la répartition de l'azote dans les composantes du rendement de maïs.

4-2-3-3- Bassin versant de Linsinlin

❖ Croissance des plants du maïs

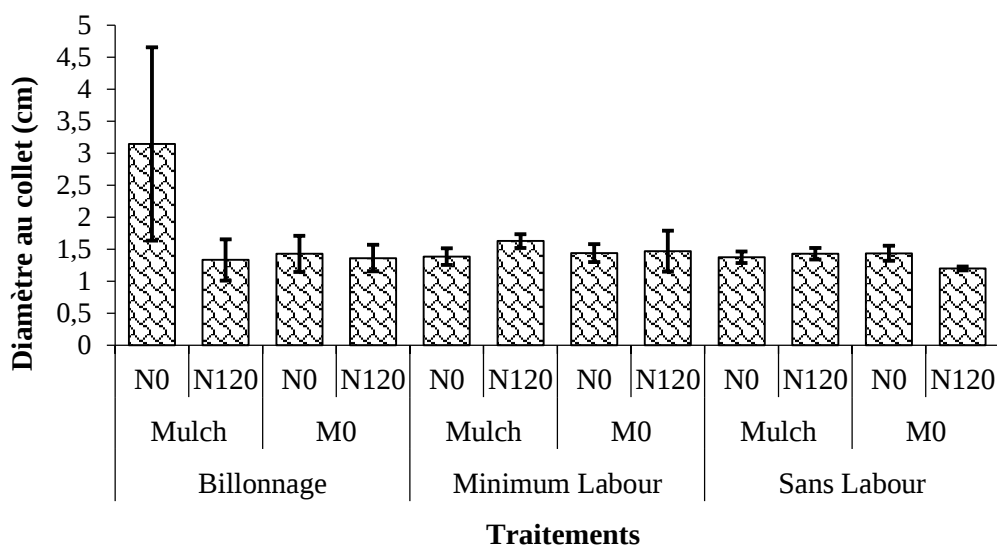
La vitesse de croissance des plants du maïs (cm/j), le nombre de feuilles par plant, le diamètre au collet des plants (cm) et la surface foliaire (cm²) ont été déterminés pour évaluer la croissance des plants de maïs. Les facteurs étudiés, simples ou combinés (travail du sol, mulching et azote) n'ont aucun effet significatif sur les paramètres de croissance des plants du maïs (Tableau 6 Annexe). Toutefois, le semis direct a la vitesse de croissance et la surface foliaire les plus élevées (3cm/j et 81 cm²). Par contre, le nombre de feuilles par plant et le diamètre au collet les plus élevés ont été obtenus au niveau du billonage. Le mulching a aussi amélioré les paramètres de croissance des plants du maïs même si cette amélioration n'est pas significative. Cependant, la fertilisation azotée a diminué la croissance des plants du maïs à travers le nombre de feuilles par plant ; le diamètre au collet et la surface foliaire (Tableau 36).

Le billonage combiné avec le mulch sans apport d'azote a généré le nombre de feuille par plant et le diamètre au collet les plus élevés (Figure 84 et 86). La meilleure vitesse de croissance des plants est obtenue au niveau du semis direct combiné au mulch et à l'apport d'azote (3,67 cm/j, Figure 85). La surface foliaire la plus importante est obtenue au niveau du semis direct combiné avec le mulch sans apport d'azote (103 cm, Figure 87).

Tableau 36: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la croissance des plants de maïs.

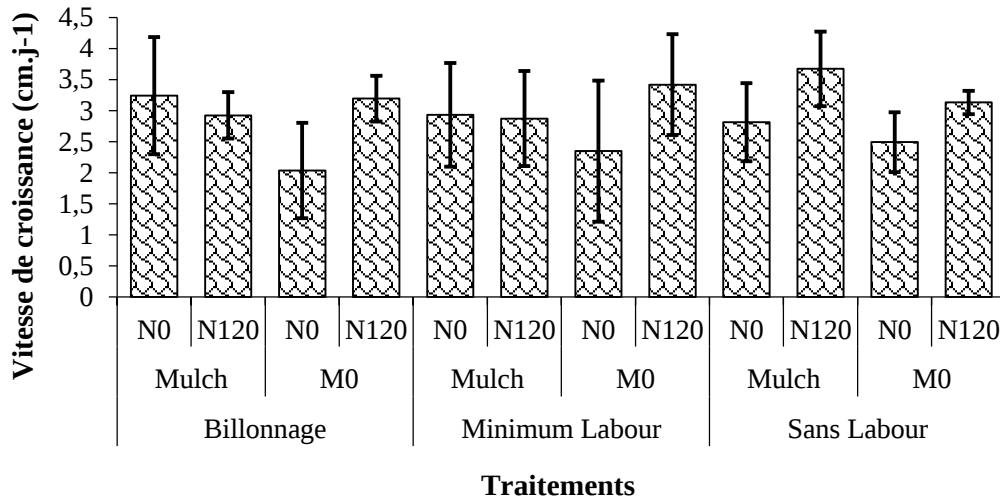
Facteurs	Modalités	Vitesse de croissance (cm/j)	Nombre de feuilles	Diamètre au collet (cm)	Indice foliaire (cm ²)
Travail du sol	SL	3,03 ± 0,25a	11,63 ± 0,30a	1,36 ± 0,05a	81,26 ± 12,70a
	B	2,85 ± 0,32a	14,46 ± 2,82a	1,82 ± 0,41a	72,37 ± 14,86a
	ML	2,90 ± 0,40a	11,33 ± 0,39a	1,48 ± 0,09a	80,99 ± 10,09a
	ppds	ns	ns	ns	ns
Mulching	M0	2,77 ± 0,27a	11,22 ± 0,36a	1,39 ± 0,07a	67,83 ± 9,51a
	Mulch	3,08 ± 0,26a	13,72 ± 1,86a	1,72 ± 0,27a	88,59 ± 10,38a
	ppds	ns	ns	ns	ns
Azote	N0	2,65 ± 0,30a	13,47 ± 1,88a	1,70 ± 0,27a	83,62 ± 11,37a
	N120	3,20 ± 0,21a	11,47 ± 0,35a	1,40 ± 0,08a	72,80 ± 8,83a
	ppds	ns	ns	ns	ns

SL = Sans labour ; B = Billonnage ; ML = Minimum labour ; M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée ; ppds = plus petite différence significative ; ns = non significatif ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.



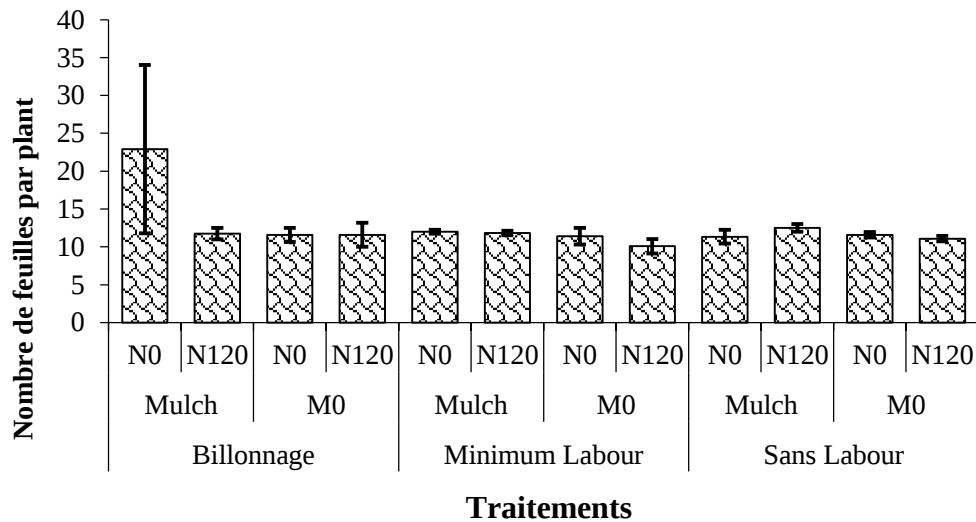
M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 84: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur le diamètre au collet des plants du maïs.



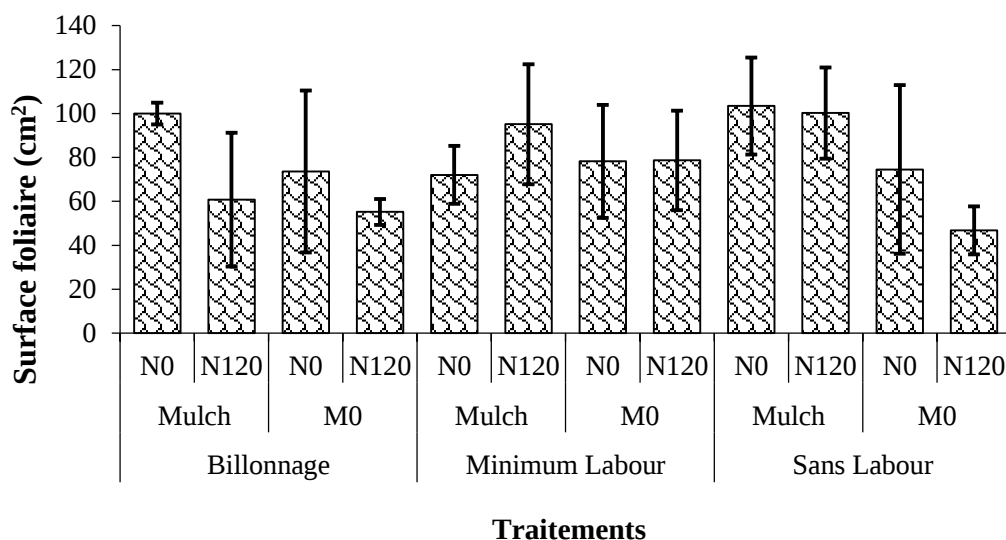
M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 85: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la vitesse de croissance des plants du maïs.



M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 86: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur le nombre de feuilles par plant du maïs.



M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 87: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur la surface foliaire des plants du maïs.

❖ Rendements du maïs

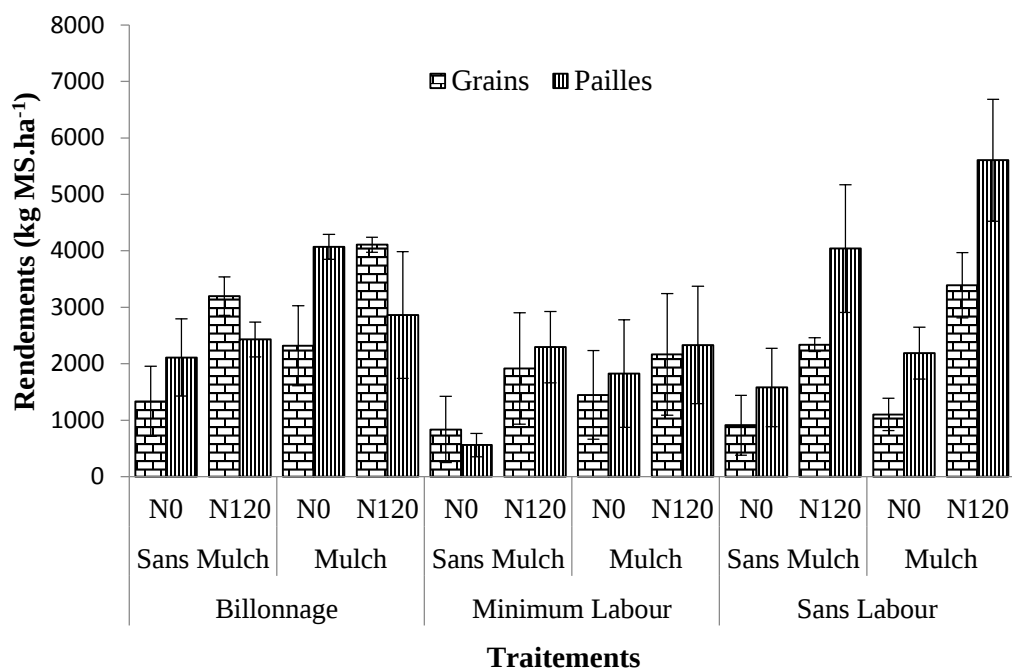
Les composantes du rendement du maïs sont influencées significativement par l'apport d'azote (Tableau 7 Annexe). Le travail du sol n'a un effet significatif que sur les rendements grains et biomasse. Le mulch a influencé significativement une seule composante de rendement (biomasse). Si le billonage a généré le meilleur rendement en grains, rafles, et spathes (2739, 593, 841 kg MS/ha respectivement), le semis direct a engendré significativement le rendement le plus élevé en biomasse (3353 kg MS/ha). Le mulching a aussi amélioré la plupart des composantes de rendement. L'azote a amélioré significativement les rendements grains de 1324 à 2852 kg MS/ha, rafles de 308 à 630 kg MS/ha, spathes de 353 à 920 kg MS/ha et biomasse de 2055 à 3260 kg MS/ha (Tableau 37). Le billonage, le mulching et l'azote ont amélioré l'indice de récolte. Mais cette amélioration n'est pas significative au seuil de 5%.

Le travail du sol en combinaison avec l'azote a un effet significatif sur le rendement en biomasse du maïs. Les autres combinaisons n'ont aucun effet significatif sur les composantes de rendement du maïs. Néanmoins, on a obtenu des améliorations de productivité du maïs de façon arithmétique. Le meilleur rendement grains de maïs est obtenu au niveau du billonage combiné avec le mulch et l'apport d'azote (4107 kg MS/ha, Figure 88) avec un bon indice de récolte de 49,55% (Tableau 90). La production la plus importante de biomasse aérienne a été obtenue au niveau du semis direct combiné avec le mulch et l'apport d'azote (Figure 89).

Tableau 37: Effet du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les composantes du rendement de maïs sur le bassin versant de Linsinlin

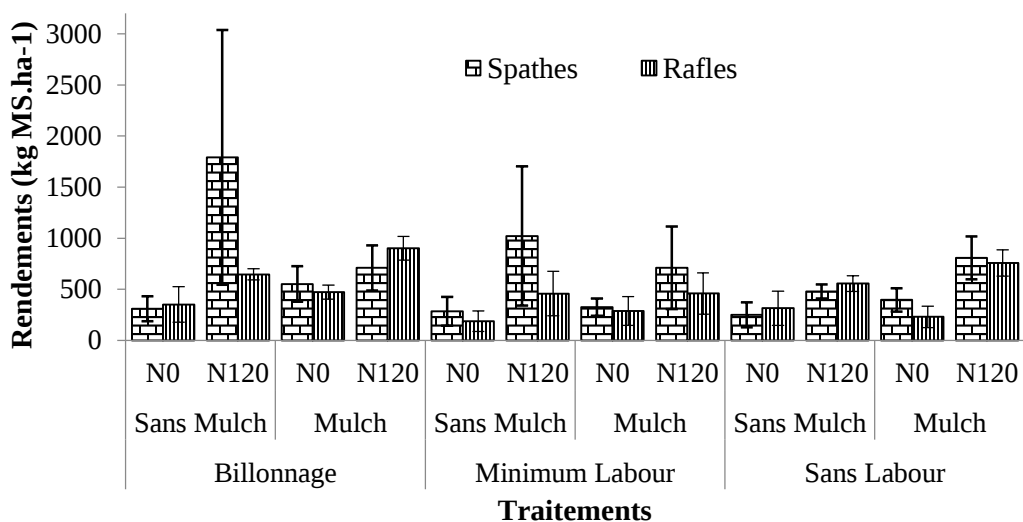
Facteurs	Modalités	Rendement Grains (kg MS/ha)	Rendement Rafles (kg MS/ha)	Rendement Spathes (kg MS/ha)	Rendement Biomasse (kg MS/ha)	Indice de récolte (%)
Travail du sol	SL	1934,80 ± 351,78ab	465,08 ± 81,73ab	483,24 ± 85,31a	3352,79 ± 608,72a	30,34 ± 2,46a
	B	2739,16 ± 377,51a	593,08 ± 78,79a	840,89 ± 322,61a	2868,74 ± 367,82ab	38,01 ± 3,31a
	ML	1590,72 ± 404,74b	348,22 ± 81,06b	585,50 ± 195,08a	1751,78 ± 396,44b	35,64 ± 2,33a
	ppds	924,88	202,18	ns	1148,4	ns
Mulching	M0	1755,39 ± 287,07a	419,04 ± 61,78a	689,66 ± 242,82a	2169,15 ± 343,75b	33,79 ± 2,01a
	Mulch	2421,07 ± 342,53a	518,55 ± 73,90a	583,43 ± 88,43a	3146,40 ± 438,89a	35,54 ± 2,60a
	ppds	Ns	Ns	ns	937,65	ns
Azote	N0	1324,24 ± 240,02b	307,94 ± 50,29b	353,24 ± 50,49b	2055,03 ± 327,03b	31,75 ± 2,07a
	N120	2852,21 ± 294,09a	629,65 ± 63,22a	919,85 ± 234,78a	3260,52 ± 434,96a	37,58 ± 2,37a
	ppds	755,17	165,08	530,62	937,65	ns

SL = Sans labour ; B = Billonnage ; ML = Minimum labour ; M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée ; ppds = plus petite différence significative ; ns = non significatif ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.



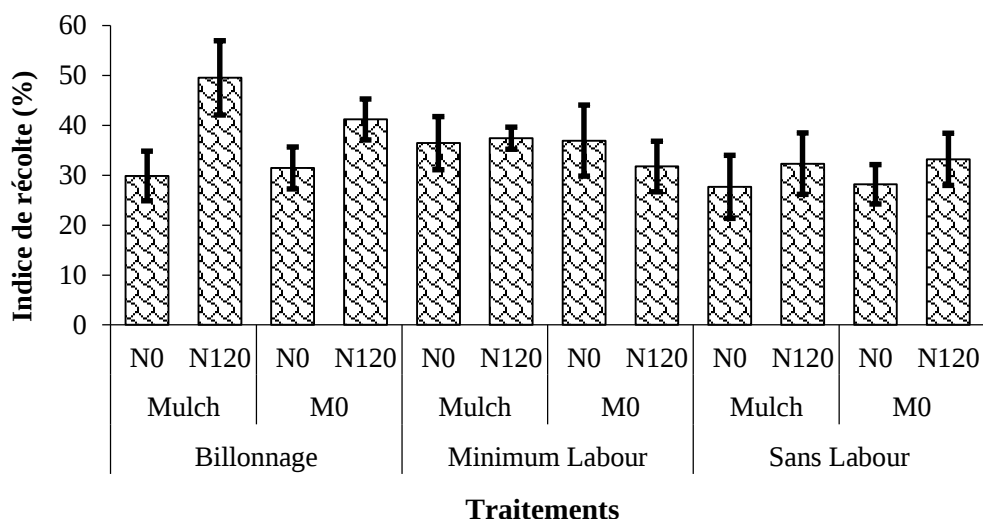
N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 88: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements grains et pailles du maïs.



N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 89: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur les rendements rafles et spathes du maïs.



M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 90: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'indice de récolte du maïs.

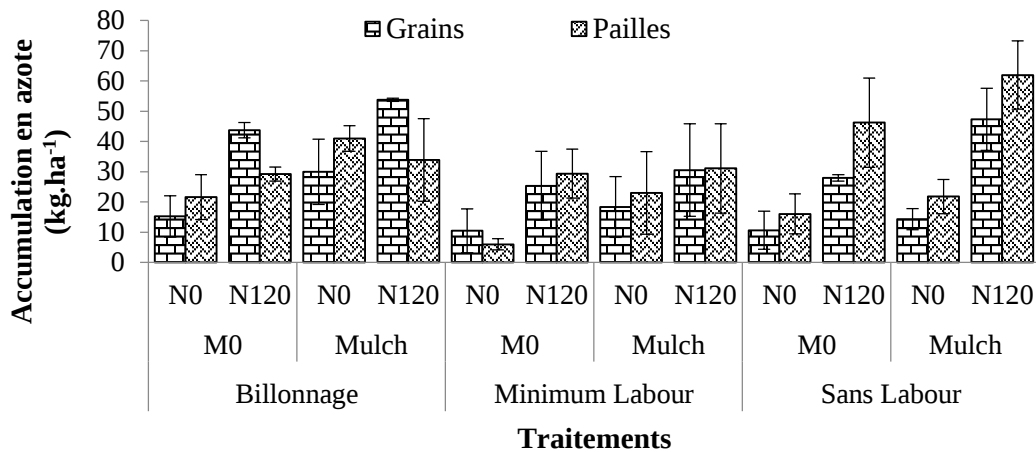
❖ Accumulation de l'azote dans les parties aériennes de la plante

De tous les facteurs étudiés, seul l'azote a un effet significatif sur le rendement en azote des organes aériens des plants du maïs. Le mulching a influencé significativement le rendement en azote des grains du maïs (Tableau 8 Annexe). La combinaison de ces facteurs n'a non plus d'effet significatif sur le rendement en azote des plants de maïs. L'apport d'azote a amélioré significativement le rendement en azote des plants du maïs et surtout l'azote des grains de maïs de 16,5 à 38,1 kg/ha. Le rendement en azote des grains de maïs a été aussi amélioré significativement par le mulching de 22 à 32 kg/ha (Tableau 38). La combinaison des facteurs a donné des résultats similaires à ceux obtenus au niveau des composantes de rendement du maïs. Au niveau du billonnage, l'apport d'azote améliore plus le rendement en azote des parties aériennes des plants du maïs (Figures 91 ; 92 et 93). Au niveau du minimum labour sans mulch, l'apport d'azote diminue le rendement en azote des grains. Il en est de même pour les combinaisons avec le semis direct.

Tableau 38: Effet du travail de sol et du mulching sur le rendement en azote des composantes de rendement du maïs

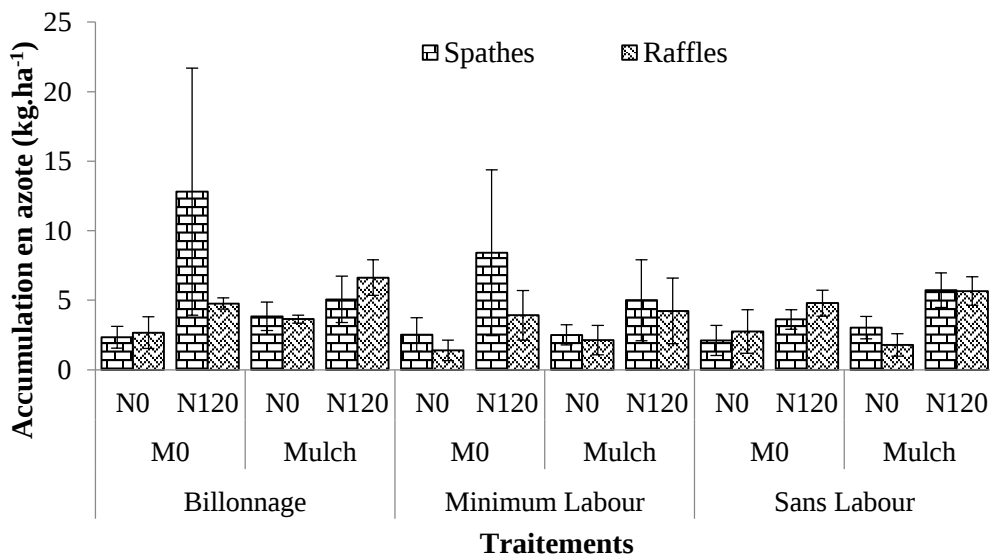
Facteurs	Modalités	Azote grains (kg/ha)	Azote Raffles (kg/ha)	Azote Spathes (kg/ha)	Azote Biomasse kg/ha)	Taux d'azote grains (%)
Travail du sol	SL	25,05 ± 5,09b	3,75 ± 0,66a	3,62 ± 0,58a	35,57 ± 3,03a	36,50 ± 7,09a
	B	35,68 ± 5,19a	4,42 ± 0,59a	6,01 ± 2,30a	31,40 ± 4,06a	44,35 ± 3,7a
	ML	21,16 ± 5,35b	2,92 ± 0,78a	4,61 ± 1,62a	22,35 ± 5,51a	40,78 ± 2,80a
	ppds	12,232	ns	ns	ns	ns
Mulching	M0	22,23 ± 3,67b	3,38 ± 0,51a	5,30 ± 1,80a	24,74 ± 4,10a	38,73 ± 2,43a
	Mulch	32,37 ± 4,80a	4,01 ± 0,61a	4,19 ± 0,61a	35,43 ± 5,07a	41,74 ± 2,92a
	ppds	9,9875	ns	ns	ns	ns
Azote	N0	16,49 ± 3,128b	2,40 ± 0,39b	2,72 ± 0,355b	21,55 ± 3,60b	37,02 ± 2,41a
	N120	38,11 ± 4,00a	4,10 ± 0,54a	6,77 ± 1,749a	38,61 ± 4,94a	43,45 ± 2,77a
	ppds	9,9875	1,485	3,9735	11,692	ns

SL = Sans labour ; B = Billonnage ; ML = Minimum labour ; M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée ; ppds = plus petite différence significative ; ns = non significatif ; Dans la même colonne et pour un même facteur, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.



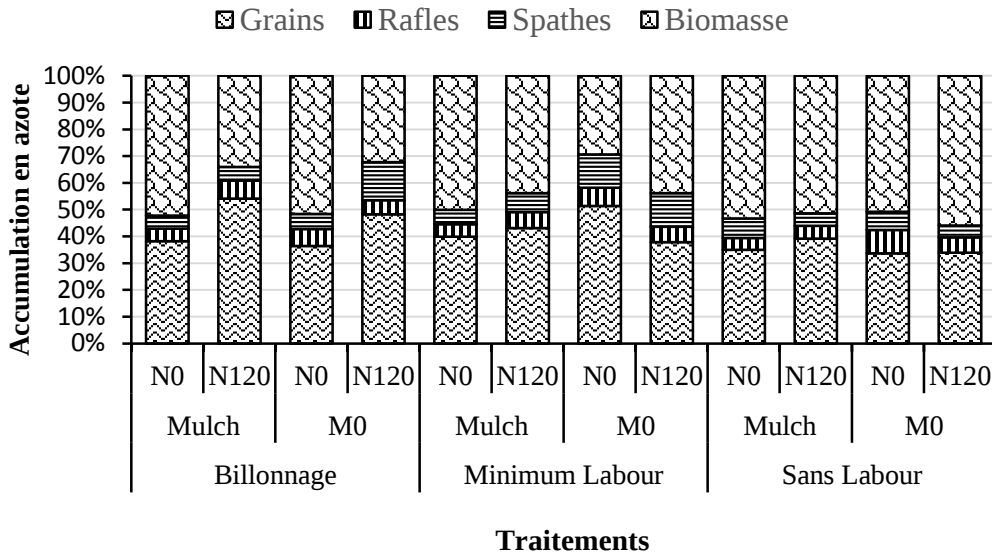
M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 91: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des grains et des pailles du maïs.



M0 = Sans mulch ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 92: Effet combiné du travail du sol, du mulching et de l'azote sur l'accumulation en azote des rafles et des spathes du maïs.



M0 = Sans labour ; N0 = Sans azote ; N120 = Apport de 120 kg.ha⁻¹ d'azote sous forme d'urée

Figure 93: Effet combiné du travail du sol et du mulching sur la répartition de l'azote dans les composantes du rendement de maïs.

4-2-4- Discussion

La croissance du maïs

La croissance du végétal est liée à sa durée de vie, son cycle de floraison et les conditions pédoclimatiques. Elle est aussi variable selon les différentes espèces, les soins prodigués, sachant que d'autres facteurs rentrent également en ligne de compte tels que le système de culture. Les résultats ont montré que les plants de maïs se développent lentement au niveau du semis direct. Cela peut s'expliquer par le fait que sur la parcelle sans labour, le sol est compact et ne permet pas une bonne infiltration de l'eau, une bonne circulation de l'air pour la respiration des racines et le bon développement des racines. De nombreux auteurs ont trouvé des résultats similaires de croissance des plants sur différents systèmes de travail du sol. Ceux de Mrabet (2001) qui montrent une similarité des hauteurs à maturité entre système conventionnel et semis direct. Il constate que le traitement sans labour sur des sols argilo-sableux ne permet pas un bon accroissement des plants de maïs. Ce qui confirme nos résultats. De même Abdellaoui et al., (2006) révèlent des réductions de hauteur avec le non labour comparativement au conventionnel. Les opinions des agronomes sur le travail du sol restent divergentes. Certains pensent que le travail du sol profond et, spécialement le labour, a des effets bénéfiques sur le sol et les cultures et devrait être généralisé. D'autres considèrent que ses effets ne sont pas assez importants et réguliers pour garantir les charges que cette technique entraîne chez les paysans. Ils notent aussi que le travail profond du sol peut avoir des effets néfastes sur

une longue période, comme le développement de l'érosion et l'accélération de la minéralisation de la matière organique. Ils recommandent le semis direct ou le travail minimum du sol. Toutefois, les chercheurs s'accordent sur le rôle du mulch sur l'amélioration des propriétés physico-chimique et biologique du sol qui permet l'accroissement des plantes. Les traitements avec mulch ont connu un développement végétatif important comparativement au traitement sans mulch. Nos résultats confirment ceux obtenus par les auteurs (Findeling *et al.*, 2003 ; Diallo *et al.*, 2006) qui concluent que la préparation du sol en milieu forestier (labour ou lit de semence) augmentait l'établissement et la croissance du ginseng américain à la première saison de croissance et ce, grâce à un meilleur développement racinaire favorisant la prise d'eau et d'éléments minéraux dans le milieu.

La productivité du maïs

Le niveau de production d'une culture est la résultante des différentes variables constitutives du rendement. Mekhlouf *et al.* (2011) ont constaté qu'il n'y a aucune différence significative entre les différentes techniques de travail du sol sur les rendements en grains et en paille de la culture de blé. Ce résultat corrobore ceux Mrabet (2001) qui indique une similarité des rendements entre système conventionnel et semis direct. Par contre d'autres auteurs révèlent des réductions en rendement au niveau du semis direct comparativement au conventionnel (Lopez-Bellido *et al.*, 2000 ; Payne *et al.*, 2000 ; Abdellaoui *et al.*, 2006). Plusieurs auteurs ont obtenu les mêmes résultats selon lesquels le semis direct génère de faible rendement. C'est le cas de Kihara *et al.* (2011) qui ont montré que le semis direct combiné ou non au mulching génère le rendement en grains du maïs le plus faible durant les deux premières années de culture. Les résultats obtenus sont aussi conformes à ceux de Blaise and Ravindran (2003) et Diaz-Zorita (2000). Le faible rendement du semis direct par rapport au labour conventionnel a été signalé ailleurs en Afrique (Hoogmoed, 1999 et est attribué à la formation de croûtes, surface d'étanchéité des pores pour la percolation de l'eau et le ruissellement (Osunbitan *et al.*, 2005 ; Rosolem *et al.*, 2002).

4-3- CONCLUSION PARTIELLE

Le travail du sol et le mulching sont de bonnes pratiques de conservation des sols car ils réduisent le ruissellement et par conséquent la perte de terre à un niveau minimum supportable. Le labour à plat combiné avec du mulching réduit complètement l'érosion des sols dans le bassin versant de Govié. A Lokogba, le zéro labour et le billonnage combinés au mulching sont efficaces dans la lutte contre la dégradation du sol (perte de terre et de nutriments). Dans le bassin versant de Linsinlin, l'érosion des sols est totalement réduite par le billonnage en courbe de niveau combiné avec du mulching. Ils peuvent être appropriés à notre système agricole local en termes de technologie adoptée et compatible avec les pratiques culturales existantes.

Le travail du sol et le mulching, pris isolément, ont affecté significativement la productivité du maïs. Lorsqu'ils sont combinés, le rendement du maïs a été également amélioré, mais la différence n'était pas significative. Le semis direct a généré les performances les plus faibles, même s'il est combiné au mulching alors que le billonnage avec couverture de mulch a produit les meilleures performances du maïs. Le sol serait compact, rendant difficiles le développement des racines et l'infiltration de l'eau de pluies. Quel que soit le type de travail du sol, le mulching a amélioré les performances du maïs car il réduit l'évapotranspiration du sol, conserve l'humidité au sol entre deux pluies et améliore les activités microbiennes du sol. Un essai à long terme nous permettra de voir l'évolution dans le temps de la contribution de chaque facteur d'étude à la productivité du maïs.

CHAPITRE 5

DISCUSSION GENERALE

Le processus de dégradation peut prendre plusieurs formes: érosion hydrique, érosion éolienne, modification de la composition chimique du sol, dégradation physique, dégradation biologique. La dégradation des sols est une problématique globale (Oldeman et *al.*, 1991 ; Scherr, 1999 ; Eswaran et *al.*, 2001 ; Eswaran et Reich, 2002) et complexe. La complexité tient à : i) la diversité des formes de dégradations, leurs interrelations et imbrications, leur extension, sévérité et réversibilité (Van Lynden, 1995 ; Scherr 1999) ; ii) la diversité des facteurs de dégradation, qui peuvent être naturels mais surtout anthropiques (Oldeman et *al.*, 1991 ; Van Lynden 1995) ; iii) la difficulté d'établir des indicateurs, des seuils et des relations de cause à effet entre une forme de dégradation et ses impacts (Eswaran et *al.*, 2001 ; Scherr 1999) ; et iv) la difficulté d'évaluer les impacts sociaux, économiques et environnementaux immédiats et sur le long terme, à l'endroit où les dégradations se produisent et au-delà (Van Lynden 1995 ; Malik, 1998 ; Scherr, 1999 ; Lipper et Osgood, 2001). L'activité humaine est la principale cause de dégradation des sols. L'objectif général de la présente étude visait à étudier l'effet des pratiques culturelles sur la dégradation du sol de trois bassins versants du Sud-Bénin.

5-1- Rappel des questions et des hypothèses de recherches

Pour atteindre les objectifs spécifiques de cette étude, des hypothèses ont été formulées. Le test de ces hypothèses permettra de répondre aux différentes questions posées.

Q1 : Quelle perception les agriculteurs ont-ils du phénomène de la dégradation du sol et de ses causes?

H1: Les agriculteurs ont une bonne connaissance du phénomène de la dégradation du sol et de ses causes,

H2: Les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs affectent significativement leur perception de la dégradation du sol.

Q2 : Quelles sont les pratiques culturelles des agriculteurs sur les bassins versants?

H3: Les pratiques culturelles des agriculteurs varient d'un bassin versant à un autre;

H4: Les caractéristiques sociodémographiques des agriculteurs influencent significativement leurs pratiques culturelles.

Q3 : Le sol des bassins versants étudiés est-il dégradé?

H5: Le sol des bassins versants étudiés est dégradé;

H6: L'état de la dégradation du sol varie d'un bassin versant à un autre.

Q4 : Quelle est l'effet de quelques pratiques culturales à la lutte contre la dégradation du sol?

H7: Le travail du sol et le mulching réduisent significativement la dégradation du sol,

H8: Le travail du sol et le mulching améliorent significativement la productivité du maïs.

5-2- La perception des agriculteurs sur la dégradation du sol

Pour une solution durable, réellement adoptée en masse par les agriculteurs, la présente étude a pris en compte la participation de ceux-ci. Ainsi, les savoirs locaux et la compréhension du phénomène de la dégradation du sol par les agriculteurs ont été analysés. Car les paysans sont les premiers, les plus grands connaisseurs de leur environnement pour être les acteurs qui façonnent (par la combinaison de pratiques de dégradation et de restauration) cet environnement. Nos résultats ont montré que les agriculteurs ont une très bonne connaissance du phénomène de dégradation du sol et ses causes. La première hypothèse est ainsi validée. Le savoir paysan est très vaste dans ce domaine de la gestion et de la protection des sols (CT/PIIP, 2003). Kriegl et Mabrouk (1997) notent là une connaissance approfondie des facteurs du milieu qui influencent la production végétale (édaphique, topographique, hydrologique, etc). Conscient de l'état de dégradation de celui-ci, perçu à travers les variations du milieu naturel, le paysan « vit » avec l'érosion et s'est servi de techniques simples pour la gérer (Ratsivalaka, 2012). Les paysans, en raison des connaissances longuement acquises de leurs milieux se basent sur des indicateurs pour évaluer la qualité de leurs terres (M'Biandoun et Bassala, 2007). Moges et Holden (2006) ont montré dans la zone Sidama du sud de l'Ethiopie que les agriculteurs sont capables d'identifier des indicateurs de l'érosion et la perte de la fertilité des sols, de prendre une vue globale de la dégradation des sols et d'avoir une connaissance approfondie des raisons de la dégradation des sols. Ils perçoivent la dégradation des sols principalement par la baisse des rendements, l'apparence du sol qui change et devient pierreux ou grossiers. L'indicateur le plus important perceptible du sol est la perte de fertilité des sols, la réduction du rendement suivie de la mauvaise performance des cultures et le jaunissement des plants. La dégradation des sols ne s'exprime pas seulement par une baisse de la fertilité mais aussi par une accélération des pertes en sol, les facteurs du milieu physique étant naturellement fragiles: le régime des pluies, souvent violentes, favorise le ruissellement, le ravinement sur les versants et l'ensablement des cultures dans les bas-fonds (Tchotsoua, 2012). Les agriculteurs ont aussi la connaissance des solutions; Toutefois, la participation aux activités de conservation des sols est minime en raison de la menace immédiate de l'insécurité alimentaire.

Des caractéristiques sociales, démographiques et institutionnelles influencent la perception des agriculteurs sur la dégradation du sol. L'éducation influe sur le niveau de sensibilisation. L'augmentation du niveau de l'éducation augmente la capacité des agriculteurs à obtenir et à utiliser les informations relatives à la dégradation du sol et aux

mesures de conservation des sols (Pender et Kerr, 1998). Les agriculteurs ayant accès à des agents de vulgarisation peuvent obtenir des informations sur la dégradation du sol et un soutien pour mieux prendre soin de leurs terres agricoles et de les préserver de la dégradation ultérieure des sols. Les connaissances acquises par l'adhésion aux organisations paysannes peut aider à comprendre le phénomène de la dégradation du sol et à faire face à l'érosion des sols (Shahriar et *al.*, 2008).

Dessalew a d'ailleurs montré en 2014 en Ethiopie que l'éducation du chef de ménage a significativement et positivement déterminé la perception par les agriculteurs des problèmes de fertilité des sols. Parmi les agriculteurs qui ne perçoivent la fertilité du sol comme un problème, 80% étaient analphabètes. Les agriculteurs alphabètes étaient plus susceptibles d'être au courant des problèmes de fertilité des sols que les agriculteurs analphabètes. Le principal avantage de l'éducation des agriculteurs est que les agriculteurs alphabétisés ont un meilleur accès aux services d'information et de vulgarisation. Car les agriculteurs alphabétisés servent souvent comme des pionniers ou des agriculteurs de contact, des leaders d'opinion pour les agents de vulgarisation dans la diffusion d'informations sur les technologies agricoles des organismes gouvernementaux (Tenge et *al.*, 2004). Par exemple, Neupane et *al.* (2002) au Népal a observé que les agriculteurs alphabètes étaient plus conscients des problèmes de fertilité des sols que les agriculteurs analphabètes. Un effet similaire de l'éducation sur la perception des agriculteurs a été rapporté dans plusieurs études (Daba, 2003). Le rapport de cotes suggère également que si un agriculteur est éduqué (alphabétisés), d'autres facteurs demeurent constants, la probabilité de prise de conscience de la fertilité du sol sera 11 fois plus élevée que pour un agriculteur analphabète. Farhan et *al.* (2015) ont également montré en Jordan que le niveau d'instruction des agriculteurs détermine leur perception de l'érosion du sol. Les agriculteurs instruits sont donc mieux conscients des problèmes d'érosion des sols. La deuxième hypothèse est donc validée.

5-3- Les pratiques culturelles des agriculteurs sur les bassins versants

L'importance et la prise en compte du savoir paysan ont été soulignées par certains auteurs déjà vers les années cinquante sans qu'il ne soit réellement considéré par les partenaires au développement. De Leener (2002) a bien dressé l'histoire des savoirs paysans dans la recherche agronomique, histoire caractérisée d'abord par une longue période de négligence de ce savoir malgré la mise en évidence de sa richesse, sa diversité et son adaptation à des exigences économiques, techniques, sociales et culturelles ; ensuite par la reconnaissance de sa valeur et sa timide prise en compte dans les actions de recherche. Il a fallu le constat unanimement reconnu de non adoption et de non adaptation des technologies pourtant pertinentes issues des stations malgré les moyens et les efforts importants déployés. Au même moment où échouaient ces technologies du fait justement de cette non adaptation aux réalités locales, un autre constat a été fait : les paysans longtemps traités d'immobilistes et de réfractaires aux propositions qui leur sont faites, développent des stratégies pour créer des technologies locales ou pour modifier celles qui

leur sont offertes par la recherche afin de les adapter à leur contexte. Cette situation a révélé au monde des partenaires au développement rural l'existence et l'importance d'un savoir local qu'il est indispensable de connaître d'abord puis de prendre en compte dans toute conception, toute action de développement. C'est de là qu'est partie l'idée de l'étude des systèmes agraires et plus particulièrement pour les agronomes, l'étude des systèmes de production ou approche système de production qui vise à connaître les pratiques des paysans dans leur environnement (CT/PIIP, 2003). Ces pratiques culturelles sont diverses et varient d'un bassin versant à un autre au Sud-Bénin. La troisième hypothèse est alors vérifiée et acceptée. Le plus grand handicap du paysan réside dans ses pratiques culturelles orientées vers l'autosubsistance et dans ses systèmes de production demeurés traditionnels, entretenant de la sorte la faiblesse des rendements. Ses activités sont peu tournées vers l'économie de marché. Les sources d'argent ne sont pas variées. D'où l'impossibilité d'investir et en conséquence de diversifier ses cultures et innover ses pratiques culturelles. De nombreuses initiatives de développement sur l'adoption des pratiques culturelles visant l'amélioration de la productivité agricole ont été frustrées par les faibles taux d'adoption de ces pratiques. Ainsi, malgré le nombre important de projets de développement initiés dans les pays les moins avancés en vue de réduire les contraintes majeures à l'adoption des innovations technologiques, on observe toujours de faibles taux d'adoption de celles-ci (Kini, 2007). Comprendre alors le rôle des facteurs influençant les décisions d'adoption peut être d'un apport important à la réussite du développement agricole. Nos résultats ont montré que plusieurs facteurs sociaux, démographiques et institutionnelles (l'âge, l'éducation, l'encadrement, etc.) influencent significativement l'adoption des pratiques culturelles par les agriculteurs, validant donc la quatrième hypothèse de cette étude. Ces résultats confirment ceux obtenus par Zoungrana (2004), au Burkina Faso, qui trouve que l'adoption des pratiques de conservation des sols est influencée entre autres par des facteurs sociaux (taille de ménage, âge du chef de ménage). De nombreuses autres études ont analysé les variables qui influencent l'adoption de nouvelles technologies dans le secteur agricole telles que l'âge, le niveau d'instruction, la taille du ménage, l'encadrement technique et l'adhésion à une organisation paysanne (Doss, 2006 ; Kabunga *et al.*, 2012 ; Matuschke et Qaim, 2009 ; Rodríguez-Entrena et Arriaza, 2013 ; Mariano *et al.*, 2012 ; Tosakana *et al.*, 2010 ; Ngondjeb *et al.*, 2011 ; Barham *et al.*, 2014 et Parcell et Gedikoglu, 2013).

5-4- Etat de la dégradation du sol

Les résultats de cette étude ont montré clairement que le sol des bassins versants est dégradé sous l'effet des pratiques culturelles. La cinquième hypothèse est alors acceptée. L'agriculture participe largement à la dégradation des sols, notamment à travers le défrichement, le labour, l'irrigation, la diffusion d'engrais chimiques et de pesticides, le surpâturage ou encore le passage d'engins lourds (Yann, 2008). A travers le monde, les exemples de sols gravement modifiés, gravement blessés, suite à leur mise en valeur, sont trop nombreux : érosion des sols ; tassement superficiel ; salinisation des sols irrigués ;

appauvrissement en matière organique. En effet, le développement des activités humaines influence de plus en plus fortement, et partout dans le monde, les fonctionnements et les propriétés des sols. En retour, ces modifications anthropiques de la pédosphère influencent les autres sphères avec lesquelles elle est interpénétrée : lithosphère, hydrosphère, atmosphère, biosphère. Selon les cas, les modifications anthropiques des dynamiques, des constituants, des structures, des propriétés des sols sont plus ou moins rapides, plus ou moins rapidement perceptibles (depuis l'échelle de la minute jusqu'à celle du siècle) : un tassement superficiel, par le passage d'un tracteur trop lourd sur un sol humide, est l'affaire d'une seconde ; la chute des activités biologiques et des teneurs en matières organiques d'un sol forestier qui vient d'être défriché pour être cultivé, est l'affaire de quelques mois ; la naissance d'un horizon sub-superficiel compacté par l'irrigation n'est perceptible qu'au bout de quelques années ; l'appauvrissement en éléments fins argileux des horizons superficiels d'un sol cultivé n'est perceptible qu'au bout d'une ou plusieurs décennies (Ruellan, 1998). Les résultats montrent que les pratiques culturales influencent significativement la dégradation du sol sous tous ses aspects. Un faible taux de la matière organique du sol et une structure de faible stabilité sont souvent associés à la dégradation du sol (Caravaca *et al.*, 2002 ; Hernanz *et al.*, 2002). Le travail du sol accélère le rythme de renouvellement des agrégats et diminue la protection de la matière organique du sol (Six *et al.*, 2004). De plus, une gestion qui limite le renouvellement de la matière organique du sol ou l'activité des vers de terre diminue la stabilité des agrégats. La technique du *dry farming*, basée sur le travail fréquent du sol, est largement utilisée dans les systèmes pluviaux, céréaliers notamment, pour pallier l'insuffisance et la variabilité des pluies. Le défrichement, la déforestation, le surpâturage et le brûlis des résidus de culture sont aussi fréquemment pratiqués (Skouri, 1993). Ces pratiques entraînent une diminution de plus de la moitié du taux de la matière organique du sol en un temps record. Parallèlement, la densité apparente du sol augmente et la stabilité à l'eau de ses agrégats diminue (Lahmar et Ruellan, 2007). En revanche, des pratiques de conservation sont très peu utilisées par les producteurs selon le bassin versant. Des recherches récentes ont déjà montré que les pratiques de conservation à savoir la réduction du travail du sol et l'utilisation d'outils qui ne retournent pas et ne pulvérisent pas le sol, le zéro labour, la couverture du sol par les résidus de cultures et les amendements organiques contribuent à stabiliser les agrégats et à relever le taux de la matière organique et l'activité biologique des sols (Kribaa *et al.*, 2001 ; Mrabet *et al.*, 2001 ; Hernanz *et al.*, 2002 ; Pagliai *et al.*, 2004 ; Moreno *et al.*, 2006).

L'érosion hydrique est la forme de dégradation du sol la plus répandue au sud du Bénin et s'amplifie particulièrement dans les zones de pente telles les bassins versants. Une première évaluation des possibilités offertes par la méthode d'étude de l'érosion des sols utilisant les radionucléides (^{137}Cs et de l'excès du ^{210}Pb) sur les bassins versants étudiés nous a permis de confirmer non seulement l'état dégradé du sol des sites, mais aussi la variation de l'état de la dégradation du sol d'un bassin à un autre. Le bassin versant de Lokogba est le plus dégradé suivi du bassin versant de Govié. Le bassin versant de

Linsinlin est le moins dégradé des bassins étudiés. La sixième hypothèse est donc vérifiée. Cette méthode de l'utilisation des traceurs radioactifs dans la quantification du taux d'érosion a été utilisée par plusieurs auteurs et depuis les années 60 (Bouhlassa et al., 2000; Benmansour et al., 2006; Damnati et al., 2004; Nouira et al., 2003).

5-5- Le travail du sol et le mulching dans la lutte contre la dégradation du sol

Pour lutter contre cette forme de dégradation du sol qu'est l'érosion hydrique, notre étude a mis en essai quelques pratiques de conservation du sol connues et ou pratiquées par les agriculteurs. Nos résultats ont montré que le labour et le mulching influencent significativement le ruissellement et la perte de terre et de nutriments. Le zéro labour, le minimum labour et le billonnage isohypse contrôlent l'érosion du sol. Lorsqu'ils sont combinés au mulching, la lutte contre l'érosion semble être plus efficace. A partir de ces résultats, la septième hypothèse est acceptée, donc validée. Ces résultats ont été déjà obtenus par plusieurs auteurs tels que Mazarei et Ahangar, 2013 ; Madarasz et al., 2011 ; Raclot et al., 2009 ; Giller et al., 2009 ; Guy et Lauver, 2006 et Van Muysen et al, 2002. Ces pratiques de conservation ont amélioré la productivité des céréales notamment du maïs. En contrôlant la dégradation du sol (perte de terre et de nutriments), le rendement du maïs a atteint son niveau maximum sur le labour combiné au mulching, validant la huitième hypothèse de cette étude. Certains auteurs ont obtenu les mêmes résultats et ont constaté que le rendement du maïs est minimal en semis direct ou zéro labour (l'agriculteur y a noté un démarrage lent des cultures, expliqué par le faible affinage du lit de semences, mais un certain rattrapage ensuite, lié probablement à l'absence de mottes compactes) ; les parcelles avec engrais portent les rendements maximaux (Barthès et al., 1998). Les mêmes résultats ont été obtenus par Goalbaye et al. (2014) au Tchad ; Bitijula et al. (1984). Le mulch au sol serait à l'origine de la conservation de l'humidité. La conservation de l'humidité du sol a un effet bénéfique sur le développement du maïs. En effet elle éviterait le stress hydrique aux plants de maïs. Par ailleurs les deux techniques culturales ont conduit à une bonne productivité de maïs (Siemens et Dickey, 1987 ; Manlay et al., 2007). Les auteurs ont trouvé que les billons et le mulch améliorent significativement le maïs car sans labour et sans mulch, une quantité importante d'eau, qui pourrait être utilisée plus efficacement par la culture, est perdue par évaporation ; ceci est particulièrement vrai pour les régions où la température est élevée (Paliwal et al., 2002) comme c'est le cas au Bénin.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail consistait à étudier l'effet des pratiques culturales sur la dégradation du sol. De ce fait, le thème évoque, d'une part, les pratiques culturales des agriculteurs d'autre part, l'état de la dégradation du sol et enfin les pratiques de conservation du sol pour lutter contre ce phénomène. Cette étude se justifie pleinement car la dégradation du sol est une menace au développement agricole en Afrique au sud du Sahara donc au Bénin. Elle cause la baisse de la productivité des terres et réduit le rendement des cultures. En conséquence, elle entraîne l'insécurité alimentaire et la pauvreté. La démarche méthodologique utilisée dans la zone d'étude pour tester nos hypothèses de recherche a permis d'aboutir à un ensemble de conclusions principales et perspectives. De l'analyse des savoirs locaux sur le phénomène de la dégradation du sol, il ressort que les agriculteurs ont une très bonne connaissance du phénomène de la dégradation du sol. Ils expliquent la dégradation du sol par la perte de terre (érosion) et la baisse de productivité des sols. Ils perçoivent clairement les causes de la dégradation du sol et apprécient le niveau de la fertilité du sol travers des indicateurs. Ces savoirs ou connaissances sont influencés par les caractéristiques sociodémographique des agriculteurs et varient donc d'un site à un autre.

De la caractérisation des pratiques culturales des agriculteurs, nous avons identifié plusieurs pratiques, dégradantes (défrichement et brûlis, monoculture, culture continue, usage des engrais chimiques et des pesticides) ou conservatrices (mulching, usage des engrais organiques, lutte culturale et écologique contre les organismes nuisibles). Les pratiques de conservation du sol sont connues mais peu ou pas adoptées par les agriculteurs. La décision des agriculteurs d'adopter ou non une pratique culturale est sous le contrôle de certaines de ses caractéristiques socio démographiques. L'état de la dégradation du sol a été évalué sur les sites. Il en ressort que tous les sites étudiés ont un sol dégradé. L'état de la dégradation varie d'un site à un autre. Le bassin versant de Lokogba est le plus dégradé des sites à travers les propriétés physiques, chimiques et biologiques de son sol. Ces résultats ont été confirmés par l'utilisation des traceurs radioactifs (^{137}Cs et ^{210}Pb). Cette technique isotopique utilisée dans cette étude est une première au Bénin et a permis de tracer la redistribution des particules au sol des bassins versants sur 40 à 100 ans. Ces traceurs ont montré que le sol du bassin versant de Lokogba perd 17,7 t /ha/an de terre les 30 - 40 dernières années et 15 t /ha /an les 100 dernières années. Le taux d'érosion est moindre au niveau des autres sites.

De la contribution du travail du sol et du mulching à la lutte contre la dégradation du sol, il ressort que le type de labour approprié varie d'un sol à un autre. A Lokogba, le zéro labour et le billonnage combinés au mulching sont efficaces dans la lutte contre la dégradation du sol (perte de terre et de nutriments). A Govié, la pratique la plus efficace est le labour à plat combiné au mulching et à Linsinlin, il s'agit du billonnage combiné au mulching. Ces pratiques qui conservent le sol ont amélioré la productivité du maïs. A

Govié, le rendement grain du maïs a été amélioré de 0,6 à 2,3 t MS/ha avec le labour à plat combiné au mulching et à l'apport de 120 kg N/ha. Il est accru de 0,3 à 2,8 t MS/ha sur le bassin versant de Lokogba avec le billonnage en courbe de niveau combiné au mulching. A Linsinlin, le rendement grain est augmenté de 0,9 à 4,1 t MS/ha sous l'effet du billonnage en courbe de niveau combiné avec le mulching et l'azote à 120 kg N/ha.

En perspectives nous pouvons faire des suggestions pour corriger les limites de notre approche méthodologique et proposer des actions pour freiner la dégradation du sol et restaurer les terres dégradées :

- Les savoirs locaux des agriculteurs peuvent être plus étudiés, surtout par rapport aux indicateurs animaux et végétaux de la fertilité du sol sur les bassins versants.
- L'évaluation de l'état de la dégradation du sol par mesures physiques est incomplète car elle n'a pas pris en compte la texture, la structure et le type de sol.
- L'utilisation des traceurs radioactifs est une alternative moderne de l'évaluation de l'état de la dégradation du sol. Mais le nombre d'échantillons analysés n'est pas suffisant pour élaborer la carte de dégradation du sol des bassins versants. Il faudra donc approfondir l'étude avec cette technique qui, d'ailleurs coûte chère et nécessite de gros moyens financiers. C'est pour cette raison que le renouvellement du projet RAF 5063 est vivement souhaité auprès des bailleurs (AIEA) pour la suite des travaux de recherche.
- L'effet des pratiques de conservation du sol sur la dégradation du sol est à étudier de façon approfondie avec des installations de parcelles de Wischmeier plus larges, avec des matériaux définitifs pour une collecte des données sur le moyen et long termes. L'utilisation des techniques plus modernes telles que les retombées du radionucléide ⁷Be peut aider à mieux étudier l'effet de ces pratiques de conservation sur la dégradation du sol.

Nos résultats ont aussi des implications pour le développement. Ils seront très utiles pour :

- Les agriculteurs qui, à travers les résultats, comprendront qu'ils ne sont pas ignorants, qu'ils peuvent lutter contre la dégradation du sol à travers certaines de leurs pratiques culturelles sans attendre des projets d'innovations technologiques exotiques. Ainsi, un atelier de restitution des résultats serait le bienvenue dans les villages d'études. Cet atelier permettra aux agricultures de s'approprier des résultats et de les valoriser. Les agriculteurs du bassin versant de Govié devraient adopter le mulching, ceux du bassin versant de Lokogba, le minimum labour ou le billonnage avec le mulching et ceux de Linsinlin, le billonnage en courbe de niveau avec le mulching.
- Les chercheurs qui désormais doivent faire participer les agricultures aux travaux de recherche pour faciliter leur appropriation par les agriculteurs. Nos résultats permettront aussi aux chercheurs de s'approprier de nouvelles méthodes d'évaluation de l'état de la dégradation des terres et moyens de lutte contre ce phénomène. Il s'agit des techniques basées sur l'utilisation des retombées radionucléides, déjà adoptées dans plusieurs pays occidentaux depuis des décennies mais très peu utilisées en Afrique. A travers cette étude, elle est utilisée pour la première fois au Bénin.

- L'Etat qui doit utiliser nos résultats pour des décisions utiles en faveur des agriculteurs à travers le système National de Recherche Agricole et le Système National de Vulgarisation. L'Etat doit aussi aider au renouvellement et à l'actualisation des données sur la dégradation du sol au Bénin et à l'élaboration de la carte de dégradation des sols du Bénin.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abaoui J. A., El Harti E., Bachaoui A., El Ghmari A., El Bouadili. (2005).** Deux approches de cartographie de l'érosion hydrique par télédétection et SIG : cas de la région de Bin el Ouidane (haut Atlas, Maroc). Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Abdellaoui Z., Fettih S., Zaghouane O. (2006) :** Etude comparative de l'effet du semis direct et du labour conventionnel sur le comportement d'une culture de blé dur en conditions pluviales. Dans : 3^{èmes} Rencontres Méditerranéennes du Semis Direct, Saragosse (Espagne), 23-25 mars 2006.
- Abdulai A., Huffman W.E. (2005).** The diffusion of new agricultural technologies: The case of crossbred-cow technology in Tanzania. *American Journal of Agricultural Economics*, 87(3): 645-659.
- Adegbidi A., Burger K., Gandonou E., Mulder I. (1999).** Farmers' Perceptions and Sustainable Land Use in the Atacora, Benin. *Environmental Economics Programme, IIED*, 57p.
- Adégbidi A., Gandonou E., Padonou., Océni H., Maliki R., Mègnanglo M., Konnon D. (2000).** Etude des filières des intrants agricoles au Bénin. Engrais minéraux, produits phytosanitaires, semences, matériels et équipements agricoles, fertilisants organiques. Rapport d'étude Tome 2 réalisé dans le cadre de l'Initiative sur la Fertilité des Sols (IFS).MAEP/GTZ Cotonou Bénin. 106p.
- Adégbola Y.E., Sodjinou E., Houssou N., Singbo G.A. (2002).** Etude financière et socio-économique des technologies de gestion de la fertilité des sols au sud-Bénin. Rapport d'étude du Programme d'Analyse de la Politique Agricole (PAPA)/INRAB Porto-Novo, Bénin 67pp.
- ADEME (2011).** Le savoir-faire français dans le domaine de la dépollution des sols et des eaux souterraines .Plaquette, 16P.
- Adimassou Z., Kessler A., Yirga C., Stroosnijder L. (2013).** Farmers' perceptions of land degradation and their investments in land management: A case study in the central rift valley of Ethiopia. *Environmental Management* 51(5): pp 989-998, Doi 10.1007/s00267-013-0030-z
- Agbahungba A., ASSA A. (2001)** Etude de l'évaluation des sols sous culture d'*Acacia auriculiformis* (CUNA.A) et caractérisation de la matière organique de l'espèce dans trois stations forestières dans le Sud du Bénin. Actes de l'atelier scientifique 1, INRAB/MAEP/Bénin .494. p
- Agbo B. (1999).** Restoring Crop productivity in West Africa: the potential of agroforestry. *Tropical Agricultural Series* Hohenheim, Margraf Verlag (éds.) 1999, 139P.

- Agoïnon N. (2006).** Esquisse morphodynamique d'un bassin versant du cours moyen de l'Ouémé : cas du bassin versant de Tèwi. Mémoire de DEA en dynamique des Ecosystèmes et Aménagement du Territoire. FLASH/UAC; 69 p.
- Agossou V. (1983)** .Les sols béninois et leurs potentialités agricoles. Projet agro-pédologique, Etude n°260, 10 p.
- Ahaneku I.E (2010).** Conservation of soil and water resources for combating food crisis in Nigeria. *Scientific Research and Essays* Vol. 5(6), pp. 507-513. Article Number: F81467C19327
- Aho N., Kossou K.D. (1997).** Précis d'agriculture tropicale : Bases et éléments d'application. Edition du Flamboyant.464p.
- Aholoukpè H. (2002).** Impact des fumures azotée et potassique sur la productivité d'un sol ferralitique sous le nièbé (*Vigna unguiculata* (L.) Walp): Cas de Gbekandji. Thèse d'Ingénieur Agronome. Faculté des Sciences Agronomiques. Université d'Abomey-Calavi. 85p.
- Ahoyo, Adjovi N.R., Djinadou A.K.A., Adegbola Y.P., Allagbe C.M., Gotoechan M.H., Adjanooun A., Mensah G.A. (2013).** Technologie améliorées de production, de conservation et de transformation du maïs existantes au Bénin. Document Technique et d'information, Centre National de spécialisation sur le Maïs (CNS-Maïs), 40p.
- Akomangni, L. (2006).** Monographie de la commune d'Aplahoué. Cabinet Afrique Conseil, 50p.
- Alberts E.E., Neibling W.H. (1994).** Influence of crop residues on water erosion In: Unger, P.W. (Ed.), *Managing Agricultural Residues*, Lewis Publishers, Chelsea, MI: 19–39.
- Alohou E., Wennik B. (2001).**Evaluation socio-économique de quelques technologies de gestion de la fertilité des sols au Nord Bénin. Etude effectuée dans le cadre de l'Initiative sur la Fertilité des Sols (IFS). PARP/INRAB CRA-Nord Ina. 54p.
- Alongo S, Visser M, Drouet T, Kombele F, Colinet G, Btogaer J (2013).** Effets de la fragmentation des forêts par l'agriculture itinérante sur la dégradation de quelques propriétés physiques d'un Ferralsol échantillonné à Yangambi, R.D. Congo. *TROPICULTURA* 31 : 36-43.
- Amadji F., Adjé T.I., Maliki R., Téblékou K., (2004).** Rapport technique d'activité de Recherche-Développement. Campagne 2003-2004. R-D Centre/INRAB-PADSE Savè Bénin. 86p.
- Amadji G. L., Saïdou A., Chitou L. (2009).** Recycling of residues in compost to improve coastal sandy soil properties and cabbage shoot yield in Bénin. *International Journal of Biological & Chemical Science* 3 (2): 192-202.
- Amadji G., Migan D. (2001).** Influence d'un amendement organique (compost) sur les propriétés physico-chimiques et la productivité d'un sol ferrugineux tropical. *Annales des Sciences Agronomiques du Bénin* (2) 2: 123-139.

- Ambroise B. (1991).** Hydrologie des petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: processus et modèles. Séminaire du conseil scientifique du département "Science du Sol" de ARS.S-40, US Gov. Print Office, Washington, D.C., 244-252.
- Ambroise B. (1999).** La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant –Processus, Facteurs, Modèles -*H*G*A* Bucarest, 200pp.
- Amy A. (2008)** Diagnostic de la dégradation du bassin versant de la rivière Marmelade en vue de son aménagement. Thèse d'Ingénieur Agronome. UEH/FAMV, Damien, Haïti, 71p.
- Anderson J.B., Jolly D.A., Green R.D. (2005).** Determinants of farmer adoption of organic production methods in the fresh-market produce sector in California: A logistic regression analysis. 2005 Annual Meeting, July 6-8, 2005, San Francisco, California, Western Agricultural Economics Association.
- Angassa A. (2014).** Effects of grazing intensity and bush encroachment on herbaceous species and rangeland condition in southern Ethiopia. *Land Degradation and Development* 25, 438-451.
- Armand, R., Bockstaller, C., Auzat, A.-V., Van Dijk, P. (2009).** Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability. Application to conservation tillage context. *Soil Tillage Res.* 102, 27-37.
- Arshad M.A., Lowery B., Grossman B. (1996).** Physical Tests for Monitoring Soil Quality. In: Doran JW, Jones AJ (Eds). *Methods for assessing soil quality*. Madison, WI. Pp 123-41.
- Assogba, R. (2007)** Production maraîchère au Sud-Bénin : Analyse des facteurs décisionnels en matière de choix et de dimensionnement des spéculations. Thèse d'ingénieur agronome, FSA/ UAC Bénin, 140p.
- Atreya, K., sharma,S, Bajracharya, R. M. (2005).** Minimization of soil and nutrient losses in maize-based cropping systems in the Mid–Hills of central Nepal. *Kathmandu University journal of science, engineering and Technology* 1(1): 1-10.
- Auzet A-V. (1987).** L'érosion des sols par l'eau dans les régions de grande culture : aspects agronomiques. Min Env/Min Agr, CEREg-URA 95, CNRS Strasbourg, 60p.
- Auzet A-V., Boiffin J., Ludwig B. (1995).** Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 759-767.
- Avakoudjo J., Kindomihou V., Akponikpè P. I., Thiombiano A., Sinsin B. (2013).** Essences végétales et techniques de restauration des zones d'érosion (dongas) du Parc W et de sa périphérie à Karimama (Nord-Bénin). *Journal of Applied Biosciences* 69:5496 – 5509.

- Avakoudjo J., Kindomihou V., Sinsin B. (2011).** Farmers' Perception and Response to Soil Erosion While Abiotic Factors Are the Driving Forces in Sudanian Zone of Benin. *Agricultural Engineering Research Journal* 1 (2): 20-30.
- Awoyinka Y.A., Awooyemi T.T., Adesope A.A.A. (2005).** Determinants of farmers' perceptions of land degradation and adoption of soil conservation technologies among rice farmers in osun-state, Nigeria. *Journal of Environmental Extension*, 5:45-50.
- Ayuk E.T. (1997).** Adoption of agroforestry technology: the case of live hedges in the Central Plateau of Burkina Faso. *Agric. Syst.*, 54: 189-206.
- Azontondé H. A. (1994).** Dégradation et Restauration des terres de Barre au sud Bénin. Centre National d'AgroPédologie (CENAP), Cotonou-Bénin. Bull. Réseau Erosion 14 : 38-60
- Azontondé H.A. (1993).** Dégradation et restauration des terres de barre (sols ferralitiques faiblement désaturés argilo-sableux) au Bénin. *Cah. Orstom, sér. Pédol.*, vol. XXVIII, n°2: 217-226.
- Azontondé H.A. (2000).** Dynamique de la matière organique et de l'azote dans le système Mucuna-Maïs sur un sol ferralitique (terres de barre) au Sud-Bénin. Thèse de Doct. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. 241p.
- Azontondé H.A., Feller C., Ganry F., Remy J. C. (1998).** Le Mucuna et la restauration des propriétés d'un sol ferralitique au Su du Bénin, *Agriculture et développement*, n°18 : pp.55-61.
- Azontondé, A. (1998).** Le Mucuna et la restauration de la fertilité d'un sol ferralitique au sud du Bénin. *Agriculture et développement* n°18 Juin 1998 : 14-21.
- Bachaoui B., Bachaoui E.M., El harti A., Ait fora A., Abaoui J., El ghmari A. (2005).** Cartographie des zones vulnérables à l'érosion hydrique de la Ville de béli Mellal : apport de la télédétection et des systèmes D'information géographique (SIG). Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Baeza A., Del Rio M., Jimenez A., Miro C., Paniagua J. (1995).** Relative sorption of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in soil: influence of particle size, organic matter content and pH, *Radiochimica Acta*, 68, 135-140.
- Baize D. (1989).** Typologie des sols de l'Yonne. Les plateaux de Bourgogne. INRA, Orléans. 154 p.
- Balasubramanian V., Singh L., Nnadi L.A., Mokuwunye A.U. (1984).** Fertility statuts of some upland savana soils of Nigeria under fallow and cultivation. *Samaru Journal of Agricultural research*, Vol.II, n°1-2.
- Barham B.L., Chavas J. P., Fitz D., Salas V.R., Schechter L. (2014).** The roles of risk and ambiguity in technology adoption. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 97: 204-218.

- Barham B.L., Foltz J.D., Jackson-Smith D., Moon S. (2004).** The dynamics of agricultural biotechnology adoption: Lessons from series rBST use in Wisconsin, 1994–2001. *American Journal of Agricultural Economics*, 86(1): 61-72.
- Barrere B. (1994).** Influence des pratiques culturales sur l'érodabilité de deux sols viticoles méditerranéens. Mesures sous simulation de pluie. Mémoire de fin d'études de Purpan. Laboratoire des sols cultivés ORSTOM-Montpellier, 166p.
- Barthès B. Albrecht A., Asseline J., De Noni G., Roose E., Viennot M. (1998).** Pratiques culturales et érodabilité du sol dans les Rougiers de Camarés. *Etude et gestion des sols* 5, 157-170.
- Baskaran M., Coleman C.H., Santschi P.H. (1993).** Atmospheric depositional fluxes of ⁷Be and ²¹⁰Pb at Galveston and College Station, Texas, *Journal of Geophysical Research*, 98, 20555–20571.
- Bationo A., Mokwunye A.U. (1991).** Role of manure and crop residues in alleviating soil fertility constraints to crop production with special reference to the Sahelian and Sudanian zones of West Africa. *Fert. Res* 29 : 117- 125.
- Beasley D.B., Monke E.J., Huggins L.F. (1980).** ANSWERS: a model for watershed planning, *Transactions of the American Society of Agriculture and Engineering*, 23, 939-944.
- Behki R. Khan S. U. (2001).** Impact of repeated long term application of atrazine on soil properties and bound residues formation. In: "impact of long term pesticides usage on soil properties using radiotracer techniques". Proceeding of final research coordination meeting. Organized by the joint FAO/IAEA division of nuclear techniques in food and agriculture and held in Hangzhou, Zhejiang, China, 24-28 May 1999: 37-42.
- Bekele S., Holden S. (1998).** Resource degradation and adoption of land conservation technologies in the Ethiopian Highlands. A case study in Andit Tid, North Shewa. *Agric. Econ.*, 18: 233-247.
- Bekele W., Drake L. (2003).** Soil and water conservation decision behavior of subsistence farmers in the eastern highlands of Ethiopia: a case study of the Hunde-Lafto area. *Ecological Economics* 46, 437–451.
- Belay T.T. (2014).** Perception of Farmers on Soil Erosion and Conservation Practices in Dejen District, Ethiopia. *International Journal of Environmental Protection and Policy* 2 (6): 224-229. Doi: 10.11648/j.ijep.20140206.15.
- Ben Slimane, A. (2013).** Rôle de l'érosion ravinaire dans l'envasement des retenues collinaires dans la Dorsale tunisienne et le Cap Bon. Thèse de Doctorat en Cotutelle, Eaux Continentales et Société et Production végétale, Montpellier Sup Agro et INAT, France et Tunisie, 194p.
- Benmansour M., Duchemin M., Nouira A., Gallichand J. (2006).** Emploi combiné des Radioéléments, de la modélisation et des mesures aux champs pour étudier

l'érosion hydrique des sols en milieu agricole (MAROC-CANADA) : Rapport 2006. Agence Universitaire de la Francophonie et Réseau Érosion & GCES, Actions en réseau, Convention P2-2092RR621. IRDA, CNESTEN, 25 p.

- Benmansour M., Mabit L., Nouira A., Moussadek R., Bouksirate H., Duchemin M., Benkdad A. (2013).** Assessment of soil erosion and deposition rates in a Moroccan agricultural field using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb ex. *Journal of Environmental Radioactivity* 115: 97-106.
- Benmansour M., Nouira A., Benkdad A., Ibn Majah M., Bouksirat H., EL Oumri M., Mossadek R., Duchemin M. (2011)** Estimates of long and short term soil erosion rates on farmland in semi-arid West Morocco using caesium-137, excess lead-210 and beryllium-7 measurements. In: Impact of soil conservation measures on erosion control and soil quality. *IAEA-TECDOC-1665* 159–174.
- Benmansour M., Nouira A., Mabit L., Bouksirate H., Moussadek R., Mrabet R., Duchemin M., Zouagui A., Iaaich H. (2014).** Combined use of ^{137}Cs and ^{210}Pb ex to assess long term soil redistribution in a small agricultural field in Morocco. In: Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, *IAEA-TECDOC-1741*. IAEA, Vienna, pp. 149-160.
- Benmansour, M., Mabit, L., Nouira, A. (2010).** A first investigation using joint radioactive tracers (^{137}Cs and ^{210}Pb ex) to document soil redistribution rates in Morocco. *IAEA Soils Newsletter* 32, 8-10.
- Bernard, C. Mabit, L., Wichereck, S., Laverdière, M. R. (1998).** Long-term soil redistribution in a small French watershed as estimated from ^{137}Cs data. *Journal of Environment Quality*, Vol 27, 1178-1183
- Berton S. (1988).** La maitrise des crues dans les bas-fonds. Petits et micro-barrages en Afrique de l'Ouest. Dossier n°12 CF/GRET/ACCT. 474p.
- Bewket W., Sterk G. (2002).** Farmers' participation in soil and water conservation activities in Chemoga watershed, Blue Nile Basin, Ethiopia. *Land Degradation and Development* 13, 189–200.
- Biaou, G. (1991).** Régime foncier et gestion des exploitations agricoles sur le plateau Adja, Bénin. Thèse de Doctorat de 3^e cycle en Economie Rurale. Côte d'Ivoire : CIRES (Centre Ivoirien de Recherches Economiques et Sociales), 207 p.
- Bitijula, M., Lumpungu, K. and Mukole, M., (1984).** Effets de labour et de non-labour en combinaison avec l'alimentation azotée sur le rendement du maïs (CV.SHABA) *Tropicultura*, 2 (1) : 16-18.
- Blaise D., Ravindran C.D. (2003).** Influence of tillage and residue management on growth and yield of cotton grown on a vertisol over 5 years in a semi-arid region of India. *Soil Tillage Res* 70:163-173.

- Blanco-Canqui H. Lal R. (2008).** Principles of Soil Conservation and Management, Springer, 256p.
- Boa D. (1990).** Caractéristiques morphologiques des gravillons ferrugineux sur le bassin versant de Boro Borotou. *Agronomie Africaine* 2:83-94.
- Jetten, V. and Favis-Mortlock, D. (2006).** Modelling Soil Erosion in Europe, in Soil Erosion in Europe (eds J. Boardman and J. Poesen), John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/0470859202.ch50
- Boiffin J. (1994).** Place des bassins versants expérimentaux dans les études sur l'érosion hydrique des sols. In : Du concept de BVRE à celui de zone atelier dans les recherches menées en eaux continentales. Actes du Séminaire national, hydrosystèmes. Paris : CEMAGREF : 197-201.
- Boisset K. (2005).** Perspectives de développement de l'agroforesterie en Sarthe. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du titre d'ingénieur des Techniques Agricoles de Bordeaux 1, 134p.
- Bollinne A. (1982).** Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. PhD Thesis, ULg, 356p.
- Bollinne A., Laurant A. (1983).** La prévision de l'érosion en Europe atlantique : le cas de la zone limoneuse de Belgique, *Pédologie*, 23, 117-136.
- Bonhomme R., Ruget F., Derieux M., Vincourt P. (1982).** Relations entre production de matière sèche et énergie interceptée chez différents géotypes de maïs. C R Acad Sc Paris, sér III 294, pp 393-398.
- Bonn F. (1998).** La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et des SIG: possibilités, erreurs et limites. *Sécheresse*; 9 : 185-92.
- Bot A, Benites J (2005).** The importance of soil organic matter. Key to drought-resistant soil and sustained food production. FAO Soils Bulletins, 94pp.
- Bouhlassa, S., Moukhchane, M., Aiachie, A. (2000).** Estimates of soil erosion and deposition of cultivated soil of Nakhla watershed, Morocco, using 137Cs technique and calibration models. *Acta Geologica Hispanica* 35, pp. 239-249.
- Boukheir R., Cerdo O., Abdallah C. (2006).** Regional soil erosion risk mapping in Lebanon; *Geomorphology journal*. 13p.
- Boukheir R., Girard M-CP., Khawlie M., Abadallah C. (2001).** Erosion hydrique des sols dans les milieux méditerranéens : une revue bibliographique *.Etude et Gestion des sols*, vol 8, (4) PP : 231-245.
- Boyer J. (1982)** Les sols ferrallitiques: facteurs de fertilité et utilisation des sols. Paris: ORSTOM édit. Tome X, 3e trimestre, 384 p.
- Brady NC, Weil R (2002).** The nature and properties of soils. 13th ed. Upper Saddle River, Pearson Education Inc, NJ, USA.
- Brady NC, Weil R (2008).** The Nature and Properties of Soils, 14 ed. Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. Pp. 990.

- Bray RH, Kurtz LT (1945).** Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39 – 45.
- Brett C. (2004).** Farm level adoption decisions of soil water management technologies in semi-arid Eastern Kenya. In: 48th Annu.Conf. Australian Agricultural and Resource Economics Society, Melbourne, Australian, 11-13 Feb. 2004.
- Brevik EC. (2009).** Soil health and productivity. In Soils, plant growth and crop production, VerheyeW(ed.). Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), EOLSS Publishers: Oxford, UK. <http://www.eolss.net>. (accessed 5/27/2014).
- Brouwers J.H.A.M. (1993).** Rural peoples' response to soil fertility decline. The Adja case (Benin) PhD Thesis No. 93– 94, The Wageningen Agricultural University, the Netherlands.
- Brown L.R., Abramovitz J., Bright C., Flavin C., Gardner G., Kane H., Platt A., Postel S., Roodman D., Sachs A., Starke L. (1996).** “L'état de la planète”. Editions Economica, Paris, France.
- Bryan R.B. (2000)** Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology* 32 385–415.
- Buckles D., Etèka A., Osiname O., Galiba M., Galiano G. (2000).** Plantes de couverture en Afrique de l'Ouest. *Une contribution à l'agriculture durable*.
- Calvet G, Villemain P (1986).** Interprétation des analyses de terre. Ed, SCPA., pp-24.
- Cambray R.S., Playford K. Lewis G.N.J. (1985).** Radioactive fallout in air and rain: results to the end of 1984, Rep. AERE-R-11915, U.K. Atomic Energy Authority, Harwell, UK
- Campbell B.L., Elliott G.L., Loughran R.J. (1986).** Measurement of soil erosion from fallout of ¹³⁷Cs, *Search*, 17, 148-149.
- Campbell B.L., Loughran R.J., Elliott G.L. (1988).** A method for determining sediment budgets using caesium-137. In: Sediment budgets, Proceedings of the Porto Alegre Symposium, Décembre 1988, *I.A.H.S. Publication* n°174,171-179.
- Caravaca F, Masciandaro G, Ceccanti B. (2002).** Land use in relation to soil chemical and biochemical properties in a semiarid Mediterranean environment. *SoilTillRes*; 68 :23-30.
- Cerdà A., Flanagan D.C., Le Bissonnais Y., Boardman J. (2009a).** Soil erosion and agriculture. *Soil and Tillage Research* 107–108. doi:10.1016/j.still.2009.10.006.
- Cerdà A., Giménez-Morera A., Bodí M.B. (2009b).** Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 1822-1830.
- Cerdà A., Imeson A.C., Poesen J. (2007).** Soil water erosion in rural areas. *Catena (Special issue)* 71, 191–252.

- Cerdà A., Lavee H. (1999).** The effect of grazing on soil and water losses under arid and Mediterranean climates. Implications for desertification. *Pirineos* 153-154, 159-174.
- Cheggour A. (2008).** Mesures de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans un bassin versant montagneux semi-aride et spatialisation par des SIG : Application au bassin versant de la Rhèraya, Haut Atlas, Maroc. Doct d'état Es-sciences. Faculté des sciences El Jadida. 141p.
- Chérif I. (2012).** Elaboration d'approche quantitative pour l'estimation de l'érosion hydrique : Bassin versant d'El Oglâ du gouvernorat de Zaghouan. Mémoire de Mastère, Spécialité Génie Rural, Eaux et Forêts; option Hydraulique et Aménagement Rural. Département GREF. INAT. Juin 2012, 93p.
- Codjia C. (1996).** Etude de l'action fertilisante sur terre de barre du Mucuna noir (*Mucuna pruriens*) et du Mucuna blanc (*Mucuna Cochichennensis*) et de leur interaction avec des engrais minéraux, thèse d'ingénieur Agronome. P. 61.
- COGEBY (2004).** La lutte contre l'érosion, tout le monde y gagne, Pp. 4.
- CRAAQ (2005).** Guide de référence en fertilisation, 1^{re} édition : Première mise à jour. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec, 15p.
- Cremers A., Elsen A., De Preter P. et Maes A. (1988).** Quantitative analysis of radiocesium retention in soils, *Nature*, 335, 247-249.
- CT/PIIP (2003).** Savoirs paysans et innovations : Eléments de capitalisation de l'expérience du PAIIP. Cellule Technique de Promotion de l'Initiative Et de l'Innovation paysannes, Maradi, Niger, 15p.
- Daba, S. (2003).** An investigation of the physical and socio-economic determinants of soil erosion in the Hararghe highlands, eastern Ethiopia. *Land Degradation and Development* 14: 69-81.
- Dabin B. (1985).** Les sols tropicaux acides. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXI, no 1, 7-19.
- Dagnelie P. (1998).** Statistique théorique et appliquée. Tome 2:Inférences statistiques à une et deux dimensions. De Boeck et Larcier, Paris-Bruxelles, France Belgique. 659p.
- Dajoz R. (1985).** Précis d'écologie Paris. Dunad. 5^{ème} édition. In 8 ; 24. 505p.
- Damnati, B., Ibrahimi, S., et Radakovitch, O. (2004).** Utilisation du ¹³⁷Cs dans l'estimation des taux d'érosion dans un bassin versant au nord du Maroc. *Revue Sécheresse* vol 15, n°2, pp 195-199.
- Danwanon K. H. F. (2011).** Date de semis et formule d'engrais pour une meilleure productivité du maïs (*Zea mays*) sur sol ferrallitique de la commune d'Allada au Sud du Bénin. Mémoire d'Ingénieur Agronome. Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi, 96p.
- Dautrebande S. et Sohier C. (2006).** L'érosion hydrique et les pertes en sols agricoles en région Wallonne. Rapport sur l'état de l'Environnement Wallon ,122p.

- Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M., Biolders CH. (2006).** Lutter contre l'érosion des terres. Livret de l'Agriculture n°12 : Pp 41.
- De Leener P. (2002).** L'analyse paysanne des impacts comme outil pour le développement local, Maroua (Cameroon): PAAR/GTZ, 54p.
- De Leener, p. (2002).** L'analyse paysanne des impacts comme outil pour le développement local, Maroua (Cameroon): PAAR/GTZ, 54p.
- De Roo A.P.J., Offermans R.J.E., Cremers N.H.D.T. (1996b).** LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: II. Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes* 10 8, 1119–1126
- De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Ritsema C.J. (1996a).** LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins: I. Theory input and output. *Hydrological Processes* 10 8, 1107–1117.
- Délusca K. (1998).** Estimation de l'érosion hydrique des sols à l'aide de l'Equation Universelle de Perte de Sol assistée d'un Système d'Information Géographique : Le cas du bassin versant de la ravine Balan, Haïti. Thèse de la maîtrise en Etudes de l'Environnement, Faculté des Etudes Supérieures et de la Recherche, Université de Moncton, 122p.
- Démangeot J. (2000).** Les milieux naturels du globe. 300p.
- Denboba M.A. (2005).** Forest conversion – Soil degradation – Farmers' perception nexus: Implications for sustainable land use in the southwest of Ethiopia. *Ecology and Development Series* n° 26.
- Desmet P.J.J., Govers G. (1996).** Comparisons of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Systems*. 10.3:311-331.
- Dessalew, M. (2014).** Determinants of Farmers' Perception of soil and water Conservation Practices on Cultivated Land in Ankesha District, Ethiopia. *Agricultural Science, Engineering and Technology Research* 2(5) : 1-9.
- Diallo D., Boli Z., Roose E. (2006).** Labour ou semis direct dans les écosystèmes soudano-sahéliens (cas du Cameroun et Mali). Actes des journées scientifiques du réseau de chercheurs Erosion et GCES de l'AUEF. Dir. Ratsivalaka S., Serpantié G., De Noni G., Roose E. Actualité scientifique AUEF, Paris : pp 181-188, INRA (Les Colloques N° 65) ed, Paris, 16 mai 1991.
- Diaz-Zorita M. (2000).** Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Tillage Res* 54:11-19.
- Djègui N. (1992).** Influence des systèmes de culture sur le statut organique (particulièrement sur la dynamique de l'azote) des sols sur terres de barre du sud-Bénin. Thèse de Doct, INP, Toulouse, France, 191p.
- Doss C. (2006).** Analyzing technology adoption using microstudies: Limitations, challenges, and opportunities for improvement. *Agric. Econ.*,34: 207-219.

- Douthwaite B., Manyong V.M., Keatinge J.D.H., Chianu, J. (2002).** The adoption of alley farming and Mucuna: lesson for research, development and extension. *Agroforestry Systems* 56: 193–202.
- Dugué P. (1998)** Gestion de la fertilité et stratégies paysannes. Le cas des zones de savanes d'Afrique de l'Ouest et du Centre. *Agriculture et développement* (18) : 13-20.
- Dupilet D. (2003).** Guide technique de la lutte contre l'érosion des sols en caps et Marais d'opale. Parc naturel régional des caps et Marais d'opale ,44p.
- Duval L. (1962).** Dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique dans les sols, les végétaux et les engrais. *Annales Agronomiques* 469-482.
- Eberlee, J., 2005.** Les plantes de couverture pour améliorer la fertilité des sols en Afrique. www.idrc.ca/fr/ev-5554-201-1-DO_TOPIC.html
- ECOWAP (2005).** La politique agricole Régionale de l'Afrique de l'Ouest. 12p.
- Ehrenstein O. (2002).** Crop residue mulching in tropical and semi-tropical countries: An evaluation of residue availability and other technologies implications. *Soil and Tillage Research* 67:115-133. doi:10.1016/S0167-1987(02)00062-4
- Ehui S., Pender J. (2005).** Resource degradation, low agricultural productivity, and poverty in sub-Saharan Africa: pathways out of the spiral. *Agricultural Economics* 32(1):225-242. doi: 10.1111/j.0169-5150.2004.00026.x
- Eicher C.K., Baker D.C. (1984).** Etude critique de la recherche sur le Développement agricole en Afrique sub-saharienne. Québec: CRDI.
- El bouqdaoui K., Ezzine H., Emran A., Zahraoui M. (2005).** Approche Méthodologique Par Télédétection et SIG Pour L'évaluation Du Risque Potentiel D'érosion Du Bassin Versant De L'oued Srou (Moyen Atlas, Maroc). Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- El Garouani A., Chen H., Lewis L., Tribak A., Abahrour M. (2007).** Apport de la Télédétection et du SIG pour le suivi spatio-temporel de l'occupation du sol et de l'érosion nette dans le bassin de l'Oued Tlata (Maroc). Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9.
- Engel B. (2003).** Estimating Soil Erosion Using RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation) Using ArcView. 7p.
- Erenstein, O. (1997).** Labranza de conservacion o conservacion de residuos? Una evaluacion del manejo de los residuos en Mexico. In: Bolaños, J. (Ed.), *Sintesis de Resultados Experimentales 1993–1995*. CIMMYT-PRM, Guatemala, pp. 188–197.
- Eswaran H, Reich P. A (2002).** Preliminary assessment of the human impact on land systems of the world. Transactions of the 17th WCSS Bangkok, CDrom paper 2128.

- Eswaran H., Lal R., Reich P.F. (2001).** Land degradation: an overview. In: Bridges, E.M., I.D. Hannam, L.R. Oldeman, F.W.T. Pening de Vries, S.J. Scherr, and S. Sompatpanit (eds.). Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, KhonKaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India.
- Evin J. (2004).** Le Bénin en quelques chiffres. <http://slideplayer.fr/slide/11227/#> consulté le 24 juillet 2014.
- FAO (1994).** Le travail du Sol pour une Agriculture Durable. Cours de formation organisé à Niamey, Niger. <http://www.fao.org/docrep/w7304f/w7304f00.htm>
- FAO (2003).** Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne. FAO. 63p. En ligne ftp : <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/x9681f/x9681f00.pdf>
- FAO (2009).** Food security and agricultural mitigation in developing countries: Options for capturing synergies. Rome.
- FAO (2010).** L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde: Combattre l'insécurité alimentaire lors des crises prolongées. Rome.
- FAO. (2011).** Produire plus avec moins : Guide à l'intention des décideurs sur l'intensification durable de l'agriculture paysanne. Rome 2011. 101p.
- FAO-INERA (2004).** Systèmes agraires durables, vulnérabilité et bonnes pratiques agricoles dans l'Ouest du Burkina Faso. Actes de l'atelier FAO-INERA sur les bonnes pratiques agricoles .Bobo Dioulasso, Burkina-Faso, 18-20 mars 2004,166p.
- Farhan, Y., Zregat, D. and Anbar, A. (2015).** Assessing Farmers' Perception of Soil Erosion Risk in Northern Jordan. *Journal of Environmental Protection*, **6**, 867-884. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2015.68079>
- Fariya A., Farida A. (2015).** Farmers' Perception on Soil Erosion Problems and Conservation Methods among Rural Farmers in Talensi-Nabdam Districts of Upper East Region of Ghana. *Academic Research Journal of Agricultural Science and Research* 3(5): 96-101. DOI: 10.14662/ARJASR2015.011.
- Fauk R. (1956).** L'évolution du sol sous culture mécanisée, le problème du pH et sa correction. VI Congrès International de la Science du Sol. Paris 1956, Commissions IV et VI.
- Fauk R. (1962):** Les sols rouges sur sable et grès d'Afrique de l'Ouest.
- Feller C., Ganry F, Cheval M. (1982).** Décomposition et humification des résidus végétaux dans un agrosystème tropical. I. Influence d'une fertilisation azotée (urée) et d'un amendement organique (compost) sur la répartition du carbone et de l'azote dans différents compartiments d'un sol sableux. *Agronomie Tropicale* 36 (1), 9-17.
- Feoli E., Gallizia L.V., Woldu Z. (2002).** Processes of Environmental Degradation and Opportunities for Rehabilitation in Adwa, Northern Ethiopia. *Landscape Ecology* 17: 315–325.

- FIDA (2006).** Œuvre pour que les ruraux pauvres se libèrent de la pauvreté, 8P.
- FIDA (2010).** Le Rapport sur la pauvreté rurale 2011. Nouvelles réalités, nouveaux défis: de nouvelles chances pour la prochaine génération. Rome.
- FIDESPRA (2004).** Plan du développement communal d'Abomey. Rapport Principal Vision Stratégique et Programme Pluriannuel d'Investissements, 236p.
- Findeling A., Ruy S., Scopel E. (2003).** Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of Hydrology* 275, pp. 49-66. *Geo- science Révision* 10, n°4, 347-354.
- Fishman MJ, Downs S.C. (1966).** Method for analysis of selected metals in water by atomic absorption: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1540-C, p. 36-38.
- Floquet A., Mongbo R. (1998).** Des paysans en mal d'alternatives : Dégradation des terres, restauration de l'espace agricole et urbanisation au Bas Bénin. Université de Hohenheim, Weikersheim Margraf Verlag, 190 p.
- Floret Ch., Pontanier R. (éd) (2001).** De la jachère naturelle à la jachère améliorée en Afrique tropicale, le point des connaissances, Vol II, Actes du Séminaire International de Dakar, 13-16 avr. 1999, Paris John Libbey, 2 vol, vol II, 356p.
- Foltz J.D., Chang H.H. (2002).** The adoption and profitability of rbST on Connecticut dairy farms. *American Journal of Agricultural Economics*, 84(4): 1021-1032
- Foster G.R. (1990).** Process-based modelling of soil erosion by water on agricultural land. In: J. Boardman, D.L. Foster and J.A. Dearing (Editors), *Soil Erosion on Agricultural Land*. Wiley, Chichester, pp. 429-445.
- Fox D., Bérolo W, Carréga P. et Darboux F. (2006).** Mapping erosion risk and selecting sites for simple erosion control measures after a forest fire in Mediterranean France. *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 31, p. 606-621.
- Franquin, P. (1969).** Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. Cahiers ORSTOM serie Biologie 9355-95.
- Franzluebbers A.J. (2002).** Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research*, 66, 95-106. doi:10.1016/S0167-1987(02)00018-1
- Fulajtar E. (2003).** Assessment of soil erosion on arable land using ¹³⁷Cs measurements: a case study from Jaslovske Bohunice, Slovakia, *Soil&Tillage Research* pp. 13-69.
- Gaussen H. (1949).** Projets pour diverses cartes du Monde au 1/1000000. La carte écologique du tapis végétal. *Ann. Agro.*, série X, vol. 1, p. 78-102.
- Gebremedhin B., Swinton S.M. (2003).** Investment in soil conservation in northern Ethiopia: the role of land tenure security and public programs. *Agriculture Economics* Vol 29 Pp: 69-84.
- Gedikoglu H., McCann L. (2007).** Impact of off-farm income on adoption of conservation

- practices. Selected Paper at the American Agricultural Economics Association Annual Meeting, Portland, OR, 28 p.
- Gedikoglu H., McCann L., Artz G. (2011).** Off-Farm Employment Effects on Adoption of Nutrient Management Practices. *Agricultural and Resource Economics Review*, 40(2): 293-306.
- Georges Y. (2008).** Evaluation de l'érosion dans le bassin de la rivière grise (Haïti). Mémoire de Master en gestion des risques naturels, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique.
- Ghazalian P.L., Larue B., West G.E. (2009).** Best management practices to enhance water quality: Who is adopting them. *Journal of Agricultural and Applied Economics*, 41(3): 663-682.
- Giller KE, Witter E, Corbeels M et Tittonell P. (2009).** Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view *Field Crops Research* 114: 23–34.
- Goalbaye T., Cherif A., Saradoum G., Guise A. (2014).** Evaluation de la technique de non labour sur le maïs en zone soudanienne au Tchad. *Revue Scientifique et Technique Forêt et Environnement du Bassin du Congo* Volume 2. P. 28-35.
- Gockowski J., Ndoumbe M. (2004).** The adoption of intensive horticulture in Southern Cameroon. *Agric. Econ.*, 30: 195-202.
- Godard A., Rapp A. (1987).** Processus et mesure de l'érosion. Paris: CNRS, 576 p.
- González-Pelayo O., Andreu V., Gimeno-García E., Campo J., Rubio J.L. (2010).** Rainfall influence on plot-scale runoff and soil loss from repeated burning in a Mediterranean-shrub ecosystem, Valencia, Spain. *Geomorphology* 118, 444-452.
- Govers G., Takken, I., Helming K. (2000).** Soil roughness and overland flow. *Agronomie*, 20:131–146.
- Gowing J.W., Palmer M. (2008).** Sustainable agricultural development in sub-Saharan Africa: the case for paradigm shift in land husband. *Soil Use Manage.*, 24: 92-99.
- Graciela S., Salmuni F., Maldonado M., Inés L.M., Puigdemongas C., (1996).** Delimitation of the hydric erosion using Digital image processing of Landsat TM, in the aluvional plain of Valle Fértil Dept. - San Juan. Argentine. Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Salvador, Brasil, INPE, p. 375-380.
- Gros Claude IV., Deberre J.C., Martin M.A. et Matheron G. (2006).** Le semis direct sur couverture (SCV) : Une solution alternative aux systèmes de culture conventionnels dans les pays du sud. Agence française de développement, 68p.
- Guy SO, Lauver MA. (2006).** Residue cover in wheat systems following dry pea and lentil in the Palouse region of Idaho. *Soil Tillage Research* 91: 89–94

- Harmand J.M, Nutti C.F. (1998).** Effets de jachères agroforestières sur les propriétés d'un sol ferrugineux et sur la production céréalière. *In: Agriculture et Développement* n° 18 - Juin 1998.
- HE Q., Walling D.E (1997).** The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils, *Appl. Radiat. Isot.* 48 677–690.
- Henao J., Baanante C.A. (2006)** Agricultural Production and Soil Nutrient Mining in Africa. Summary of IFDC Technical Bulletin, IFDC, Muscle Shoals, Alabama, USA.
- Hernanz JL, López R, Navarette L, Sánchez- Girón V. (2002).** Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. *SoilTillRes*; 66:129-41.
- Hickey R. (2000).** Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. *Cartography*, vol. 29, no.1, pp. 1 - 8.
- Hiepe J. (2008).** Erosion du sol dans le bassin versant de l'Aguima. In: Judex, M. and **Thamm, H-P. (éds.) (2008).** IMPETUS Atlas Benin. Research Results 2000-2007. 3rd edition. Department of Geography, University of Bonn, Germany. pp: 75 – 76.
- Hiepe, C. and Junge, B. (2008).** Soil erosion in the Aguima catchment. Imetus Atlas Benin, Research Results 2000-2007, 3^{ème} ed, PP : 75- 76
- Hird A.B., Rimmer D.L., Livens F.R. (1995)** Total caesium fixing potential of acid organic soils, *J. Environ. Radioactiv.* 26, 103-118.
- Hollande J.M. (2004).** The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103, 1–25. doi:10.1016/j.agee.2003.12.018.
- Honlonkou N.A. (1999).** Impact économique des techniques de fertilisation des sols : cas de la jachère Mucuna au sud du Bénin. Thèse de doct du 3^e cycle en sciences économiques, Université de Cocody-Abidjan. Pp. 26-41.
- Honlonkou, N. A. (1994).** Pression foncière, intensification et crédit agricoles au Bénin. Etude comparative des cas du Plateau Adja et de la Savane de Lonkly. Thèse d'Ingénieur agronome, Abomey!Calavi, Bénin. FSA/UNB, 197 p.
- Hoogmoed W. B. (1999).** Tillage for soil and water conservation in the semi-arid tropics. Doctoral thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands
- Hougnandan P. (2000).** Efficiency of the use of organic and inorganic nutrients in maize-based cropping systems in Benin. Phd thesis, 196p.
- Houndantodé J., Kindomihou V., Amadji G.S. Tonon F., Boko M., Sinsin B. (2011).** Utilisation des boues résiduaires en maraîchage au Sud-Bénin: Aspects physico-chimiques des sols traités et impact sur le rendement de culture d'*Amaranthus cruentus* Linn., actes du Troisième Colloque des sciences, cultures et technologies de l'UAC-Bénin vol. III, 352-353.

- Houndékon V.A., Gogan A.C., (1996).** Adoption d'une technologie nouvelle de gestion des ressources naturelles : cas du mucuna dans le Sud-Bénin. RAMR, Institut National des Recherches Agricoles du Bénin, Cotonou, 65 p.
- Houngbo N. E. (2008).** Dynamique de pauvreté et pratiques agricoles de conservation de l'environnement en milieu rural africain le cas du plateau adja au sud-bénin. Thèse de doctorat soutenu à l'Ecole Doctoral pluridisciplinaire de UAC/FLASH. 326 p.
- Houngnandan P. (2000).** Efficiency of the use of organic and inorganic nutrients in maize-based cropping systems in Benin. Ph. D. thesis UNIVERSITEIT GENT 196 p.
- Houngnandan P. (2002).** Synoptique sur projet « restauration de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin, Résumés et abstracts de l'Atelier Scientifique Sud (3ème Edition) : 11 et 12 décembre 2002 au CRA Niaouli, 33 p.
- Hove L., Twomlow S. (2007).** Is conservation agriculture an option for vulnerable households in Southern Africa? In: Work. Conservation Agriculture for Sustainable Land Management to Improve the Livelihood of People in Dry Areas, FAO, Damascus, Syria, 7-9 May 2007.
- <http://www.uarga.org/developp-durable/phytosanitaires.php> consulté le 12 mai 2014**
- I.R.C.T. (1986).** Rapport annuel d'expérimentation au Nord Togo, Paris Institut de Recherche du Coton et des Textiles exotiques.
- IAASTD (2009).** Agriculture at a cross roads Volume V. Sub-Saharan Africa (SSA) Sub-global Report. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development, 167p.
- IFS (2002).** Plan d'action opérationnel pour la gestion durable de la fertilité des sols. Atelier de restitution du 26 et 27 février 2002. Initiative pour la Fertilité des Sols, Bénin, 45p.
- Igué A.M. (1990).** Aménagement des terres de barre au Bénin pour l'amélioration de leur productivité agricole contraintes et solutions présenté à la 10^{ème} réunion sous-comité Ouest- centre Africain de corrélation de sols pour la mise en valeur des terres (Jean 14 nov.) CENAP Cotonou- Bénin.
- Igué M.A. (2013) :** Etat, besoins et priorités pour une gestion durable des sols au Bénin. Launch of Global Soil Partnership in Western and Central Africa 4-6 February 2013 Accra/ Ghana, 47p.
- INSAE (2003).** 3^{ème} Recensement General de la Population et de l'Habitation (RGPH3) : Synthèse des analyses, Cotonou : Direction des Etudes Démographiques, 42 p.
- INSAE (2004).** Cahier des villages et quartiers de ville. Département du Couffo. Cotonou : INSAE, 26 p.

- Isikwue M.O. (2005).** Influence of nutrients and sediment loads from two rivers in Benue State on crop production, a PhD Thesis submitted to University of Nigeria, Nsukka.
- Jones Jr. J.B, Wolf B, Mills H.A. (1991).** Methods of Elemental Analysis (Chapter 4) pp27-38. In: Plant Analysis Handbook. Micro-Macro Publishing, Inc. 183 Paradise Blvd., Suite 108, Athens, Georgia.
- Joseph F.R. (2003)** Diagnostic de la dégradation du bassin versant de la rivière de Fonds-Verrettes en vue de son aménagement. Mémoire de fin d'études agronomiques, UEH/FAMV, Damien, Haïti, 49p.
- Kabunga N.S., Dubois T., Qaim M. (2012).** Heterogeneous information exposure and technology adoption: The case of tissue culture bananas in Kenya. *J. Agric. Econ.*, 63: 444-464.
- Kalisa A. (2004).** Characterisation of farming systems in southern Rwanda. Mémoire d'Ingénieur Agronome, Université Nationale de Rwanda, 51p.
- Kallon J.M., George J.B., Amara D.S., Gichuru M.P., Nolte C., Erannayake I.J (1998).** Effects of tree pruning and fertiliser levels on food production, nutrient balance and soil fertility in a continuous two- year alley mixed of Sierra-leonne, in Renard et al (éds.) 1998: Pp 259-266.
- Kassa Y., Beyene F., Haji J., Lejesse B. (2013).** Farmers perceptions of the impact of land degradation and soil and water conservation measures in west Hareghe zone of oromia national regional state, *Ethiopa. Journal of Bilogy, Agriculture and healthcare* 3(11):12-19.
- Kauark Leite L.A. (1990).** Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole, Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Pp. 342.
- Kern, J.S., et M.G. Johnson. (1993).** Conservation Tillage Impacts on National Soil and Atmospheric Carbon Levels. *Soil Science Society of America Journal* 57: 200-210.
- Khisa P., Gachene C.K.K., Karanja N.K., Mureithi J.G. (2002).** The effect of post-harvest crop cover on soil erosion in a maize-legume based cropping system in Gatanga, Kenya. *Journal of Agriculture in the Tropics and Subtropics* 103: 17-28.
- Kihara I., Bationo A., Mugendi D. N., Martius C., Vlek P. L. G. (2011).** Conservation tillage, local organic resources and nitrogen fertilizer combinations affect maize productivity, soil structure and nutrient balances in semi-arid Kenya. Nutrient cycling in Agro ecosystems volume 88 issue 1. In: innovations as key to the Green Revolution Africa vol 1: Exploring the scientific facts. 155-167.
- King C., Baghdadi N., Lecomte V., Cerdan O. (2005).** The application of remote-sensing data to monitoring and modelling of soil erosion. *Catena* 62 (2005) 79-93.

- King D., Le Bissonnais Y. (1992).** Rôle des sols et pratiques culturales dans l'infiltration et l'écoulement des eaux : exemple du ruissellement et de l'érosion sur les plateaux limoneux du nord de l'Europe. *CR Acad Agric Fr*, 78: 91-105.
- Kini J. (2007).** Analyse des déterminants de l'adoption des technologies de Conservation des eaux et des sols au Burkina Faso. Université de Ouagadougou. DEA, 61p.
- Kinnell P.I.A., Risse L.M. (1998).** USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 1667-1672.
- Kirkby M., Le Bissonais Y., Coulthard T.J., Daroussin J., McMahon MD. (2000).** The development of land quality indicators for soil degradation by water erosion. *Agriculture Ecosystems and Environment* 81: 125–135.
- Knisel, W.,G., Jr., (Editor), 1980.** CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems. U.S. Department of Agriculture, Conservation Report No. 26.
- Knowler D., Bradshaw B. (2007).** Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, 32(1): 25-48.
- Koirala S., Cabral P. (2007).** Land Use Land Cover Change And Its Impact On Soil Erosion Process In Begnas Tal Rupa Tal Watershed Using Geospatial Tools, Kaski Distirict, Nepal. European Commission, Erasmus Mundus Programme, M.Sc. in Geospatial Technologies, project n°2. 2007 – 0064. 13 p.
- Köller, K. (2003).** Techniques of Soil Tillage, p. 1-25, *In* A. El Titi, ed. Soil Tillage in Agroecosystems. CRC Press LLC, Boca Raton.
- Kosmas C., Danalatos N., Cammeraat L.H. (1997).** The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. *Catena*, 29: 45-59.
- Kotschi J. (2015).** A soiled reputation. Adverse impacts of mineral fertilizers in tropical agriculture. AGRECOL – Association for AgriCulture and Ecology, 60p.
- Kouelo A.F. (2004).** Etude comparée de la contribution de sept légumineuses herbacées à l'amélioration de la production du maïs et des caractéristiques chimiques du sol. Thèse d'Ingénieur Agronome, Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi. 151p.
- Kouelo A.F. (2011).** Pratiques de gestion de la fertilité des bas-fonds rizicoles de la Commune de Dassa-Zoumé. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA). Ecole doctorale de la Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-calavi. 103p.
- Kribaa M, Hallaire V, Curmi P, Lahmar R. (2001).** Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil Till Res*; 60: 43-53.
- Kriegl M, Mabrouk A. (1997).** Méthodes culturales et lutte anti-érosive : leçons tirées du savoir-faire paysan. In : Gestion durable des ressources naturelles : leçons

- tirées du savoir-faire des paysans de l'Adar. Niamey (Niger) : Ministère de l'Agriculture et de l'Élevage (MAE): 44-105.
- Kurothe R.S., Kumar G., Singh R., Singh H.B., Tiwari S.P., Vishwakarma A.K., Sena D.R. Pande V.C. (2014).** Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India, *Soil & Tillage Research* 140:126–134.
- Labreuche, J., Viloingt, T., Caboulet, D., Daouze, J.P., Duval, R., Ganteil, A., Jouy, L., Quere, L., Boizard, H., et J. Roger-Estrade. (2007).** Evaluation des impacts environnementaux des Techniques Culturelles Sans labour (TCSL) en France. Partie I: La pratique des TCSL en France. ADEME.
- Lahamar, R. et Ruellan, A. (2007).** Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : La pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable. Synthèse pression sur les ressources et développement durable. Cahiers Agriculture Vol.16 n°4, 318-323.
- Lal R. (1986).** Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained productivity, In Steward, B.A. (ed) *Advances in Soil Science* (Vol. 5). New York, USA: Springer-Verlag.
- Lal R. (2001).** Soil Degradation by Erosion. *Land Degradation and Development* 12: 519-539. doi: 10.1002/ldr.472
- Lal R. (2007).** Constraints to adopting no-till farming in developing countries. *Soil Tillage Res.*, 94: 1-3.
- Lal, R., Reicosky, D.C., et J.D. Hanson. (2007).** Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil and Tillage Research* 93:1-12.
- Lapar M.L.A., Pandey S. (1999).** Adoption of soil conservation: The case of the Philippines uplands. *Agric. Econ.*, 21: 241-256.
- Le Bissonnais Y., Bruand A., Jamagne M. (1989a).** Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles : apport à la notion d'érodabilité des sols, *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique*, XXV, 31-40.
- Le Bissonnais Y., Cerdan O., Lecomte V., Benkhadra H., Souchère V., Martin P., (2005)** Variability of soil surface characteristics influencing runoff and interrill erosion. *Catena* 62, pp. 111-124.
- Le Bissonnais Y., Thorette J., Bardet C., Daroussin J. (2002).** L'érosion hydrique des sols en France. Rapport INRA, IFEN, Novembre 2002. 106p.
- Leguedois S. (2003).** Mécanismes de l'érosion diffuse des sols : modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés. Thèse Université Orléans.
- Leguedois S., Planchon O., Legout C. (2005).** Splash projection distance for aggregated soils: theory and experiments. *Soil Science Society of America Journal* 69, 30-37.

- Leh M., Bajwa S., Chaubey I. (2013).** Impact of land use change on erosion risk: and integrated remote sensing geographic information system and modelling methodology. *Land Degradation and Development* 24, 409-421.
- Leonard J., Andrieux P. (1998).** Infiltration characteristics of soils in Mediterranean vineyards in Southern France. *Catena*; 32: 209-223.
- Leys A., Govers G., Gillijns K., Berckmoes E., Takken I. (2010).** Scale effects on runoff and erosion losses from arable land under conservation and conventional tillage: The role of residue cover, *J. of Hydrology* 390: 143–154.
- Lieser K.H., Gleitsmann B., Peschke S., Steinkopff T. (1986).** Colloid formation and sorption of radionuclides in natural systems, *Radiochimica Acta*, 46, 39-47.
- Lieskovský J., Kenderessy P. (2014).** Modelling the effect of vegetation cover and different tillage practices on soil erosion in vineyards: a case study in Vrábce (Slovakia) using WATEM/SEDEM. *Land Degrad. Develop.* 25: 288–296. DOI: 10.1002/ldr.2162.
- Lilin C. (1979).** Recherches sur l'érosion des sols : propositions. In : Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg - Colmar, 20-23 septembre 1978, ed. par H. Vogt et T. Vogt, 249-251.
- Lipper L., Osgood D. (2001).** Two essays on socio- economic aspects of soil degradation. FAO Economic and social development paper, 149. Rome: United Nations Food and Agriculture Organisation (FAO).
- Livens F.R., Baxter M.S. (1988).** Chemical associations of artificial radionuclides in Cumbrian soils, *Journal of Environmental Radioactivity*, 7, 75-86.
- Livens F.R., Rimmer D.L. (1988).** Physico-chemical controls on artificial radionuclides in soil, *Soil Use and Management*, 4, 63–69.
- Lompo D.J.P. (2007).** Impact des résidus de pesticides sur la biologie des sols dans les agro systèmes cotonniers du Burkina Faso. Mémoire de Diplôme d'Etude Approfondie en Gestion Intégrée des Ressources Naturelles (GIRN) Option : Sciences du sol, IDR, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 58p.
- Lopez-Bellido L., Lopez-Bellido R.J., Gasstillo J.E., Lopez-Bellido F.J. (2000).** Effects of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on wheat under rainfed mediterranean conditions. *Agron. J.* :92 : 1054-1063
- Loughran R.J. (1989).** The measurement of soil erosion, Progress in *Physical Geography*, 13, 216-233.
- Ludwig B., Auzet A.V., Boiffin J., Papy F., King D., Chadœuf J. (1996).** Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France, *Etude et Gestion des Sols*, 3, 53-70.
- Ludwing B. (2000).** Les déterminants agricoles du ruissellement et de l'érosion de la parcelle au bassin versant. Ingénieries-EAT-°n-22 PP 37-47.
- M'Biandoun, M. et Bassala J-P.O. (2007).** Savoir paysan et fertilité des terres au Nord-Cameroun. *Cahier Agricultures*, vol. 16, n° 3, pp. 185-197.

- Mabit L., Bernard C., Laverdière M.R (2002a).** Quantification of soil redistribution and sediment budget in a Canadian watershed from fallout caesium-137 (¹³⁷Cs) data. *Can. J. Soil Sci.* 82 (2002) 423–431.
- Mabit L., Laverdière M. R., Bernard C. (2002b).** L'érosion hydrique : Méthodes et études de cas dans le nord de la France. *Cahiers Agricultures* 2002 ; 11 :195-206.
- Mabit, L., Bernard, C., Makhlouf, M., Laverdière, M. R. (2008).** Spatial variability of erosion and soil organic matter content estimated from 137Cs measurements and geostatistics. *Geoderma* 145, 3–4. Amsterdam.
- Madarasz B., Badonyi, K., Csepinszky, B., Mika, J. et Kertesz, A. (2011).** Conservation tillage for rational water management and soil conservation. *Hungarian Geographical* 60(2):117-133.
- MAEP (2007).** Rapport synthèse de la mission conjointe de suivi des projets et programmes de développement agricole, 64p.
- MAEP (2010).** Rapport annuel d'activités; Bénin ; 106p.
- MAEP (2011).** Plan Stratégique de Relance du Secteur Agricole (PSRSA). Ministère de l'Agriculture de l'élevage et de la pêche, 116p.
- Malik, S.J. (1998).** Rural poverty and land degradation: reality check for the CGIAR. CGIAR Technical Advisory Committee and FAO. Rev.1. Rome: United Nations Food and Agriculture organisation (FAO). www.fao.org/Waidocs/TAC/x5784E/x5784e0d.htm
- Maliki, R., Amadi, F., Adje, I. et Englehart, C. (2000).** Durabilité sociale de quelques systèmes agroforestiers de la région des collines au centre du Bénin. *Bulletin de la recherche agronomique*, INRAB n°30, 17p.
- Mando A., Zougmore R., Zombé P.N., Hien V. (2001).** Réhabilitation des sols dégradés dans les zones semi-arides de l'Afrique subsaharienne.in : Floret, ch.et Pontanier, R. *La jachère en Afrique tropicale* Tome 2 PP.311-339.
- Manlay, R.J., Feller, C., Swift, M.J., (2007).** Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 119, 217-233.
- Mariano M.J., Villano R., Fleming E. (2012).** Factors influencing farmers' adoption of modern rice technologies and good management practices in the Philippines. *Agricultural Systems*, 110: 41-53.
- Marra M., Pannell D.J., Abadi Ghadim A. (2003).** The economics of risk, uncertainty and learning in the adoption of new agricultural technologies: where are we on the learning curve? *Agricultural Systems*, 75(2-3): 215-234.
- Marston R. A, Dolan L.S. (1999).** Effectiveness of sediment control structures relative to spatial patterns of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology*; 31: 313-323.
- Martín-Moreno C., Duque M., Francisco J., Ibarra N., Manuel J., Hernando Rodríguez N., Sanz Santos M.G., Sánchez Castillo L. (2013).** Effects of

- topography and surface soil cover on erosion for mining reclamation: the experimental spoil heap at El Machorro mine (Central Spain). *Land Degradation and Development*. DOI: 10.1002/ldr.2232.
- Matuschke I., Qaim M. (2009).** The impact of social networks on hybrid seed adoption in India. *Agric. Econ.*, 40: 493-505.
- Maumbe B.M., Swinton S.M. (2003).** Hidden health costs of pesticide use in Zimbabwe's smallholder cotton growers. *Social Science & Medicine*, 57, 1559-1571. doi: 10.1016/S0277-536(03)00016-9.
- Mazarei M., Ahangar A.G. (2013).** The Effects of Tillage and Geographic Factors on Soil Erosion: A Review", *Intl J Agri Crop Sci*. Vol 6 (14), 1024-1031.
- Mc HENRY J.R. (1968).** Use of tracer technique in soil erosion research, *Transaction of the American Society of Agricultural Engineering*, 11, 619-625.
- Mekhlouf A., Makhoul M., Achiri A., Aitouali A., Kourougli S. (2011).** Etude comparative de l'effet des systèmes de travail du sol et des précédents culturaux sur le sol et le comportement du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) en conditions semi-arides ; 14 p.
- Mekuria W., Aynekulu E. (2013).** Exclosure land management for restoration of the soils in degraded communal grazing lands in Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development* 24: 528–538. DOI: 10.1002/ldr.1146.
- Melalih A. (2012).** Analyse des techniques de conservation de l'eau et du sol dans la zone aride : cas bassin versant d'AIN SEFRA. Diplôme de Master en sciences Agronomiques Université Abou-berk Belkaid de Tlemcen, 144p.
- Meusburger K.I., Bänninger D., Alewell C. (2010).** Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12 (2010) 201–207.
- Meyer L. D., Dabney S. M., Murphree C. E., Harmon W. C. (1999).** Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils", *Trans. ASAE* 42(6): 1645 -1652.
- Michel C. (1982).** Appréciation des phénomènes d'érosion hydrique des terres agricoles et de l'impact économique des travaux de protection. In: Recent development in the explanation and prediction of erosion and sediment yield, Proceedings of the Exeter symposium, Juillet 1982, *I.A.H.S. Publication* n°137, 33-38.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005).** Ecosystems and human well-being: current state and trends, volume 1. Washington: Island Press. Available from <http://www.millenniumassessment.org/en/Condition.aspx#download>
- Miralles J. (2004).** Etude couplée des radionucléides et des isotopes stables du plomb en Méditerranée occidentale. Thèse de Doct Es-Sciences de l'Université P. Cezanne, Ecole doctorale Géosciences de l'Environnement n°04 A130008, 149P.

- Mitchozounnou M. (2011).** Evaluation des terres pour la culture du coton dans la Commune de Djidja au Bénin. Mémoire pour l'obtention du grade de Master II en géographie, Université d'Abomey-Calavi, 80p.
- Moges W., Holden N.M. (2006).** Farmers' perceptions of soil erosion and soil fertility loss in southern Ethiopia. *Land Degradation and Development* 18(5):543-554. Doi:10.1002/ldr.795.
- Montanarella L. (1999).** Le sol à l'interface de l'agriculture et de l'environnement. Agriculture et Environnement, Europa .www.europa.eu.
- Montcho M. (2015).** Dégradation et baisse de fertilité des sols au Bénin. Blog Femmes-Agriculture-Développement rural. [Https : agriculture au féminin.wordpress.com](https://agricultureaufeminin.wordpress.com)
- Moore G. (2001).** Soil guide: A handbook for understanding and managing agricultural soils, Bulletin 4343. The National Library of Australia, Cataloguing-in-Publication entry, Pp. 388.
- Moreno F, Murillo JM, Pelegrín F, Girón IF. (2006).** Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. *Soil Till Res*; 85 :86-93.
- Morgan R.P.C, McIntyre K, Vickers A.W, Quinton J.N, Rickson R.J. (1997).** A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. *Soil Technology*; 11: 291-299.
- Morgan R.P.C., Quinton J.N., Smith R.E., Govers G., Poesen J.W.A., Chisci G., D. Torri (1998).** The EUROSEM model. In *Modelling Soil Erosion by Water*, eds. J. Boardman and D.T. Favis-Mortlock. NATO-AS1 Series 1-55. Berlin: Springer-Verlag, pp. 389-398
- Morsli B., Mazour M., Medejel N., Hamoudi A., Roose E. (2004).** Influence de l'utilisation des terres sur les risques de ruissellement et d'érosion sur les versants semi-arides du Nord de l'Algérie. *Sécheresse* 15 (1)-96-104.
- Mrabet R, Saber N, El-Brahli A, Lahlou S, Bessam F. (2001).** Total particulate organic matter, and structural stability of a calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semi-arid area of Morocco. *Soil Till Res*; 57:225-35.
- Mrabet R. (2001).** Le semis direct : une technologie avancée pour une agriculture durable au Maroc. MADREF – DERD. N° 76, 4 p. <http://agriculture.ovh.org>.
- Mrabet R. (2002).** Stratification of soil aggregation and organic matter under conservation tillage systems in Africa. *Soil & Tillage Research*, 66, 119-128. doi: 10.1016/S0167-1987(02)00020-X.
- Munodawafa, A. (2012).** Quantifying nutrient losses with different sediment fraction under four tillage systems and granitic sandy soils of Zimbabwe; INTECH, 44p

- Munodawafa, A., (2007).** Assessing Nutrient Losses with Soil Erosion under different tillage Systems and their implications on water quality. *Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C* 32(15); 1135-1140.
- Nederlof E. S., Dangbegenon C. (2007).** Lessons for farmer-oriented research: experiences from a West African soil fertility management project. *Agr Hum Val.*, 24: 369-87.
- Neupane R.P, Sharma K.R, and Thapa G.B. (2002).** Adoption of Agroforestry in the Hills: logistic regression analysis. *Agricultural Systems*, 72: 177-196.
- Ngondjeb, Y., Nje, P., Havard, M. (2011).** Déterminants de l'adoption des techniques de lutte contre l'érosion hydrique en zone cotonnière du Cameroun. *Revue d'élevage et de médecine vétérinaire des pays tropicaux*, 2011, 64 (1-4) : 9-19.
- Nguekam W.E. (2010).** Effet des pratiques culturales sur la diversité des plantes médicinales à Ebolowa. Thèse de DESS en sciences de l'environnement, Université de Yaoundé I, Mémoire en ligne.
- Nouira, A., Sayouty, E.H. and Benmansour, M. (2003).** Use of ¹³⁷Cs technique for soil erosion study at (Casablanca region) agricultural land in Morocco. *Journal of Environmental Radioactivity*, n 68: 11-26.
- Nyakatawa E.Z., Jakkula V., Reddy K.C., Lemunyon J.L., Nourris B.E. (2001).** Predicting soil erosion in conservation tillage cotton production system using the revised universal soil loss equation (RUSLE)", *Soil and Tillage Research* 57: 213 – 224.
- OCDE (2009).** Productivité des sols et croissance pro-pauvres, dans *Ressources naturelles et croissance pro-pauvres : Enjeux économiques et politiques*, Éditions OCDE.
- Odera M.M., Kimani S.K., Musembi F. (2000).** Factors influencing adoption of integrated use of manure and inorganic fertilizer in central highlands of Kenya. In: Proc. 7th Biennial Scientific Conf., Collaborative and Participatory Research for Sustainably Improved Livelihoods. Nairobi, Kenya, Kenya Agricultural Research Institute, p. 58-64.
- Okalebo J.R., Gathua K.W., Woomer P.L. (2002).** Laboratory Methods of Soil and Plant Analysis: A working Manual. The Second Edition, Kenya, 128p.
- Okoban B.O., De Graaff J. (2005).** Farmers' knowledge and perceptions of soil erosion and conservation measures in the central Highlands, Kenya. *Land Degradation and Development*, vol 16(5): 475-487. Doi 10.1002/ldr.678.
- Oldeman LR, Hakkeling RTA, Sombroek WG. (1991).** World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory Note. Global Assessment of Soil Degradation. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC); United Nations Environment Program (UNEP).
- Opie J. (2000).** Ogallala: water for a dry land. University of Nebraska Press: Lincoln.

- Osunbitan J. A., Oyedele D. J., Adelaku K. O. (2005).** Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil Tillage Res* 82:57-64.
- Ouattara B., Savadogo P.W., Traoré O., Koulibaly B., Sédogo M.P., Traoré A.S. (2010).** Effet des pesticides sur l'activité microbienne d'un sol ferrugineux tropical du Burkina-Faso. *Cameroon Journal of Experimental Biology*, vol 06(01) :11-20.
- Ouattara N., Louppe D., Balle P. (1997).** Rôle des macro-invertébrés dans la restauration de la fertilité en zone de savane soudano-guinéenne : cas particulier des vers de terre et des termites, in Loret et Pantanier (éd., 1997) : pp. 61-68.
- Owens PN, Walling DE (1996).** Spatial variability of caesium-137 inventories at reference sites: An example from two contrasting sites in England and Zimbabwe. *Applied Radiation and Isotopes* 47, 699-707.
- Pagliai M, Vignozzi N, Pellegrini S. (2004).** Soil structure and the effect of management practices. *Soil Till Res*; 79:131-41.
- Paliwal, R. L., Granados, G. Lafitte, H. R. et Violic, A. D. (2002).** Le maïs en zones tropicales : Amélioration et production. Collection FAO : Production Végétale et Protection des plantes n°28.
- Palm C., Blanco-Canqui H., DeClerck F., Gatere L., Grace P. (2014).** Conservation agriculture and ecosystem services: an overview, *Agric. Ecosyst. Environ.* 187, 87–105.
- Pandey A., Chowdary V.M., Mal B.C. (2007).** Identification of critical erosion prone areas in the small agricultural watershed using USLE, GIS and remote sensing", *Water Resource Manage* 21:729-746.
- Parcell J.L., Gedikoglu H. (2013).** A Differential Game Approach to Adoption of Conservation Practices. 2013 Annual Meeting, August 4-6, 2013, Washington, DC, Agricultural and Applied Economics Association, 14p.
- Parsons A.J., Wainwright J., Abrahams A.D., Simaton R.J. (1997).** Distributed dynamic modelling of interrill overland flow. *Hydrological Processes*, 11: 1833-1859.
- Payne, W.A., Rasmussen P.E., Ramig R.E. (2000).** Tillage and rainfall effects upon a winter wheat–dry pea rotation. *Agron. J.*, 92: 933-937.
- PDC (2010).** Plan de Développement Communal d'Aplahoué, 40p.
- Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J., David C. (2007).** Is conservation tillage suitable for organic farming? A review. *Soil Use and Management*, 1-16. doi: 10.1111/j.1475-2743.2006.00082.x.
- Pender, J. and Kerr, J. M. (1998).** Determinants of farmer's indigenous soil and water conservation investments in semi-arid India. *Agric. Econ.* 19: 113-125.

- Piéri C. (1989).** Fertilité des terres de savane. Bilan de trente ans de recherche et de développement agricole au Sud du Sahara. Ministère de la Coopération/CIRAD, Paris, 444 p.
- PNUE (1998).** Directives pour la cartographie et la mesure des processus d'érosion hydrique dans les zones côtières méditerranéennes, Split-Croatie, 89p.
- Prager K., Posthumus H. (2010).** Socio-economic factors influencing farmers' adoption of soil conservation practices in Europe. In, Napier, T. L. *Human dimensions of Soil and Water Conservation: A Global Perspective*. Nova Science Publishers, Inc, New York, 203- 223.
- Prokopy L.S., Floress K., Klotthor-Weinkauff D., Baumgart-Getz A. (2008).** Determinants of agricultural best management practice adoption: Evidence from the literature. *Journal of Soil and Water Conservation*, 63(5): 300-311.
- Raclot D, Le Bissonnais Y, Louchart X, Andrieux P, Moussa R, Voltz M. (2009).** Soil tillage and scale effects on erosion from fields to catchment in a Mediterranean vineyard area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 134:201-210.
- Rakotondraompiana S., Randrianarison T., Collet C., Rakotoniaina S. (2011).** Analyse spatiale des propriétés physiques des zones d'érosion à l'aide de données géoréférencées, images de télédétection et données topographiques. 9^{ème} Journées du réseau de télédétection, Maroc.
- Ramade F. (1992).** Précis d'écotoxicologie. (éds). Masson 1992, 302 p.
- RAMR (1992).** Actes des ateliers sur la collaboration entre la recherche appliquée en milieu réel et les CARDER du Mono et du Zou. RAMR/INRAB Cotonou Bénin. 58p.
- Ratsivalaka, S.R., (2012).** Perception paysanne de la dégradation des terres et des types d'érosion : Impacts des programmes de LAE sur la restauration de la productivité des sols à Madagascar. In : Roose, E., Duchaufour, H. et De Noni, G., 2012. Lutte antiérosive réhabilitation des sols tropicaux et protection contre les pluies exceptionnelles, IRD, 590-606.
- Raunet M. (1973).** Contribution à l'étude pédo-agronomique des terres de barre au Bénin et au Togo. *Agr. Trop.* n°11. Pp. 1049-1069.
- Razafindakoto M. A. (2007).** Stratégie paysanne améliorée pour l'accroissement de la fertilité du sol et de sa résistance à l'érosion (Région Centre des Hauts-plateaux de Madagascar). Actes des JSIRAUF, Hanoï, 6-9 Novembre 2007, 6p.
- Rees H.W., Chow T.L., Loro P.J., Lovoie J., Monteith J.O., Blaauw A., (2002).** Hay mulching to reduce runoff and soil loss under intensive potato production in Northwestern New Brunswick, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 82:249–258.
- Reicosky, D.C., W.D. Kemper, G.W. Langdale, C.L. Douglas Jr. and P.E. Rasmussen, (1996).** Soil organic matter changes resulting from tillage and

- biomass production. *Journal of Soil and Water Conservation* 50 (3): 253-261.
- Rejaour R., Shi Z.H., Chongfa Cai. (2009).** Soil erosion hazard evaluation-An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. *Ecological Modelling* 220 (2009) 1724–1734.
- Renard K.G., Foster G.R., Weesies G.A., Mac Cool D.A., Yoder D.C. (1997).** Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agric. Handb. U. S. Gov. Print. Office, Washington, D C.
- Rhoton F.E., Shipitalo M. J. Lindbo D. L. (2002).** Runoff and soil loss from midwestern and southeastern US silt loam soils as affected by tillage practice and soil organic matter content”, *Soil and Tillage Research* 66(1): 1 -11.
- Rishirumuhirwa T. (1997).** Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricoles dans les hauts plateaux de l’Afrique orientale (application au cas de la région Kimiro-Burundi). Lausanne : Thèse doctorale, École polytechnique fédérale, 320 p.
- Ritter J. (2012).** L’érosion du sol-causes et effets. Fiches techniques, Ministère de l’Agriculture, de l’Alimentation et des Affaires Rurales, Ontario, Canada
- Roche P.A. (2003).** L’eau, enjeu vital pour l’Afrique. Contemporaine-Printemps 2003, Dossier : pp 39-75.
- Rockstrom J., Hatibu N., Oweis T.Y., Wani S., Barron J., Bruggeman A., Farahani J., Karlberg L., Qiang Z. (2007).** Managing water in rainfed agriculture. In: CAWMA 2007, Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture. London, UK, Earthscan.
- Rodríguez-Entrena M., Arriaza M. (2013).** Adoption of conservation agriculture in olive groves: Evidences from southern Spain. *Land Use Policy*, 34: 294-300.
- Roose E. (1994).** Une méthode traditionnelle de restauration des sols. Le zaï au pays Mossi (Burkina Faso). *Bull. Pédol. FAO*, 70, 420 p.
- Roose E. (1973).** Dix-sept années de mesures expérimentales de l’érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d’Ivoire, Contribution à l’étude de l’érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse de doctorat Ingénieur, Faculté des Sciences de l’Université d’Abidjan, 147p.
- Roose E. (1977).** Erosion et ruissellement en Afrique de l’ouest. Vingt années de mesure en parcelle expérimentales. Travaux et doc. ORSTOM Paris 78 : 108 p.
- Roose E. (1981).** Dynamique actuelle des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d’Afrique occidentale. Étude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. Collection Travaux et Documents. Paris : ORSTOM, 130 : 587 p.

- Roose E.J. (1986).** Runoff and erosion before and after clearing depending on the type of crop in western Africa. "Land clearing and development in the tropics"(R. Lal, ed.), 317-330.
- Rosolem C. A., Foloni J. S. S., Tiritan C. S. (2002).** Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. *Soil Tillage Res* 65:109-115.
- Rubas D. (2004).** Technology adoption: who is likely to adopt and how does the timing affect the benefits? , These, Texas A&M University, 128 p.
- Ruellan, A. (1998).** Dégénération et gestion des sols. In : Condray, J. 1998 : L'environnement en milieu tropical. Pp 29-37. WWW.bibliotheque.auf.org/index.php?M=notice&doid=572
- Saber N. (2002).** La qualité du sol sous semis direct en milieu semi-aride marocain. Thèse de
- Saber N., Mrabet R. (2002).** Impact of no tillage and crop sequence on selected soil quality attributes of a vertic calcixeroll soil in Morocco. *Journal Agronomie*. vol. 22, no5, pp. 451-
- Sadiki A. (2004).** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation et la cartographie des risques d'érosion par l'Equation universelle des pertes en sol dans le Rif oriental (Maroc) : cas du bassin versant de l'oued Boussouab, *Bulletin de l'Institut Scientifique*, Rabat, section Sciences de la Terre, n°26, p. 69-79.
- Saïdou A. (2005).** Capitalisation des expériences et pratiques en matière de restauration et de gestion de la fertilité des sols et de lutte anti-érosive. Rapport principal MAEP, PAMRAD, CTB. 115p.
- Saïdou A., Dossa F. E., Gnanglè P. C., Balogoun I. et Aho N. (2012).** Evaluation du stock de carbone dans les systèmes agroforestiers à Karité (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn), *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin* (BRAB), Numéro spéciale agriculture et forêt. 9p.
- Sall S., Norman D., Featherstone A.M. (2000).** Quantitative assessment of improved rice variety adoption: the farmer's perspective. *Agric. Syst.*, 66: 129-144.
- Sandor J.A., Furbee L. (1996).** Indigenous knowledge and classification of soils in the Andes of Southern Peru. *Soil Sciences Society of America Journal* 60: 1502-512.
- Sanjay K., Jain, Goel M.K. (2002).** Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. *Hydrologicat Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(1) p 31-40.
- Sauer J., Zilberman D. (2009).** Innovation behaviour at farm level-Selection and identification. 49th annual meeting of the German. Association of Agricultural Economics and Sociology, GEWISOLA, Kiel, 26 p.

- Scherr S.J. (1999).** Soil degradation. A threat to developing country food security by 2020? Food, agriculture, and the environment discussion paper 27. Washington (DC): International Food Policy Research Institute (IFPRI).
- SCRIP (2007).** Stratégies de Croissance pour la Réduction de la Pauvreté. SCRIP, Gouvernement du Bénin, Cotonou, Bénin. 117.
- Sedogo P. M. (1993).** Évolution des sols ferrugineux lessivés sous culture: incidence des modes de gestion sur la fertilité. Thèse Doct., Mention Sciences Naturelles, Univ. Nat., Côte d'Ivoire. 329p.
- Segalen P. (1995).** Les sols ferrallitiques et leur répartition géographique. Les sols ferrallitiques en Afrique et en Extrême-Orient, Australie et Océanie: conclusions générales. Paris: édit. ORSTOM, tome III, Pp. 201.
- Séguy L. (2006).** Le semis direct sur couverture végétale permanente (SCV) : une solution alternative aux systèmes de culture conventionnels dans les pays du Sud. Dossier AFD 2006, Paris France. 68p.
- Shahriar M. W., Mukand S. B., Ashim D. P., and Jayant K. R. (2008).** Degradation-environment-society spiral: A spatial auto-logistic model in Thailand. Natural Resources Forum, Vol. 32, pp. 290–304.
- Shbeli O.E. (2005).** GIS Applications for Erosion Risk Assessment And Land Classifications North-West Libya. Workshop International Télédétection et Systèmes d'Information Géographique "Information Spatiale et Développement Durable". 14 au 16 novembre 2005, Rabat, Maroc.
- Siban P. (1972)** Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en haute Casamance. Principaux résultats. *Agronomie Tropicale* 27 5: 574-591.
- Siemens, J.C. and Dickey, E.C. (1987).** Definition of tillage systems for corn. In National corn handbook. W. Lafayette, IN, USA, Purdue University Cooperative Extension Service.
- Sinsin B. (1994).** Perspectives offertes par l'agroforesterie en Afrique tropicale. Kisangani, numéro spécial. Pp. 9-22.
- Six J, Bossuyt H, Degryze S, Denef K. (2004).** A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil Till Res*; 79:7-31.
- Skouri M. (1993).** La désertification dans le bassin méditerranéen: état actuel et tendance. In: État de l'Agriculture en Méditerranée. Les sols dans la région méditerranéenne: utilisation, gestion et perspectives d'évolution. Zaragoza: Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (Ciheam- IAMZ).
- Smaling E.M.A (1993).** An Agroecological Framework for Integrated Nutrient Management. Ph.D. Thesis Wageningen Agricultural University, Wageningen (Pays-Bas).
- Smaling E.M.A., Nandwa S.M., Janssen B.H. (1997)** Soil fertility is at stake In: Buresh, R.J, Sanchez P.A, Calhoun F. (1997) Replenishing Soil Fertility in Africa,

- SSSA Special Publication Number 51, *Soil Sciences Society of America*, America Society of Agronomy, adison, Wisconsin, pp 47 - 61p
- SMDD (2002).** Dégénération des sols et désertification. Sommet mondial sur le développement durable. Dossier d'Information pour Johannesburg/Fiche 18 : Dégénération des sols. 3p.
- Soane B.D., Ball B.C., Arvidsson J., Basch G., Moreno F., Roger-Estrade J. (2012).** Notill in northern, western and south-western Europe: a review of problems and opportunities for crop production and the environment", *Soil Tillage Res.* 118, 66–87.
- Sogon S. (1999).** Erosion des sols cultivés et transport des matières en suspension dans le bassin versant de Brie (*Application des traceurs radioactifs naturels et magnétiques*).Thèse de Doct. Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, U.F.R. de Géographie.304p.
- Stoorvogel J.J., Smaling E.M.A. (1990)** Assessment of nutrient depletion in sub-saharan Africa: 1983- 2000. Vol. III. Literature review and description of land use systems. 2nd Ed., Report No.28, the Winand Starting Centre for Integrated *Land. Soil and Water Research*, Wageningen, The Netherlands.
- Sutherland, R. A. (1996).** Caesium-137 soil sampling and inventory variability in reference locations: A literature survey, *Hydrol. Process.*, 10, 43–53.
- Tavernier R., Lizeaux C. (1993).** Sciences de la vie et de la terre. Bordas, 320 p.
- TBE (2005).** Confère les références « cellule Etat de l'environnement Wallon : Tableau de bord de l'Environnement Wallon » Ed. MRW-DGRNE.
- Tchotsoua, M. (2012).** Des stratégies traditionnelles de lutte contre l'érosion des sols sur le plateau de Ngaoundere (Nord Cameroun) pp : 146-156.
- Tekalign, M., Haque, I. and Aduayi, E.A. (1991).** Soil, plant, water, fertilizer, animal manure and compost analysis manual. Working Document Number B13. Soil Science and Plant Nutrition Section, International Livestock Center for Africa, Addis Ababa, Ethiopia.
- Tenge A, De Graaff J, and Hella J. (2014).** Social and economic factors affecting the Adoption of soil and water conservation in West Usambara highlands, Tanzania. *Land Degradation and Development*, 15:99-114.
- Terranova O., Antronico L., Coscarelli R., Iaquina P. (2009).** Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy). *Geomorphology journal* 112 (2009) 228 245.www.elsevier.com/locate/geomorph.
- Ton P., de Haan L.I. (1995).** A la recherche de l'agriculture durable au Bénin. <http://hd.handle.net/11245/1.119031>, 210p.
- Tosakana N.S.P., Van Tassell L.W., Wulfhorst J.D., Boll J., Mahler R., Brooks E.S., Kane S. (2010).** Determinants of the adoption of conservation practices by farmers in the Northwest Wheat and Range Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 65(6): 404- 412.

- Tossou H. (2013).** Etude de différentes combinaisons du phosphore et d'inoculation avec *Bradyrhizobium japonicum* sur les performances agronomiques du soja [*Glycine max* (L.) Merrill] au Sud du Bénin. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur Agronome Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi. 82p.
- Totongnon J.K., Lame B., Zannou P. (1999).** Quelques performances et contraintes d'adoption du pois d'angole (*Cajanus cajan*) et du pois mascate (*Mucuna pruriens* var. utilis) en milieu paysan dans le département de l'atlantique, République du Bénin. In : Carsky R.J., Etèka A.C., Keantinge J.D.H. et Manyong V.M. (éds.). Plantes de couverture et gestion des ressources naturelles en Afrique Occidentale. Actes de l'atelier organisé par l'IITA et le CIEPCA du 26 au 29 octobre à Cotonou Bénin. Pp. 109-119.
- Toumi S. (2013).** Application des techniques nucléaires et de la télédétection à l'étude de l'érosion hydrique dans le bassin versant de l'oued mina. Thèse de doct-es-sciences de l'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique. Algérie. 189p.
- Tovidé, G. (2013).** Déterminants de la dynamique sédentaire dans le bassin versant du petit Kouffo (un sous bassin du Zou). Mémoire de maîtrise en géographie physique, Université d'Abomey-calavi, 85p.
- Traoré S., Millogo J. R., Thiombiano L., Guinko S. (2007).** Carbon and nitrogen enhancement in Cambisols and Vertisols by Acacia spp. in eastern Burkina Faso: Relation to soil respiration and microbial biomass. *Applied Soil Ecology*, 35: 660–669.
- Twomlow S., Urolov J.C., Jenrich M., Oldrieve B. (2008).** Lessons from the field. Zimbabwe's Conservation Agriculture Task Force. *J. SAT agric. Res.*, 6.
- Udayakumara E. P. N., Shrestha R. P., Samarakoon L., Schmidt-Vogt D. (2010).** People's perception and socioeconomic determinants of soil erosion: A case study of Samanawewa watershed, Sri Lanka. *International Journal of Sediment Research* 25 (4): 323-339.
- Unger P.W. (1996).** Common soil and water conservation practices. In Soil Erosion, Conservation and Rehabilitation, ed. M. Agassi. New York: Marcel Dekker, pp: 239-266, 1996.
- Ustun B. (2008).** Soil erosion modelling by using GIS & remote sensing: a case study, GANOS mountain. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. 1681-1684.
- Valentin C. (1979).** Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies : application à l'étude de l'érodabilité des sols. In : Colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen, Strasbourg - Colmar, 20-23 septembre 1978, ed. par H. Vogt et T. Vogt, 117-122.
- Van der Knijff J.M., Jones R.J.A., Montanarella L. (2000).** Estimation du risque d'érosion en Italie.

- Van Lynden GWJ. (1995).** La ressource sol en Europe. Strasbourg : les éditions du Conseil de l'Europe.
- Van Muysen, W., Govers, G., Van Oost, K., (2002).** Identification of important factors in the process of tillage erosion: the case of mouldboard tillage. *Soil Tillage Res.* 65:77–93.
- Versteeg M., Koudokpon V. (1993).** Participative farmer testing of four low external input technologies to address soil fertility decline in Mono Province (Benin). *Agricultural Systems* 42: 265-276.
- Verstraeten G., Poesen J. (1999).** The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology* 29: 275–292.
- Vrieling A. (2006).** Satellite remote sensing for water erosion assessment: a review. *Catena*, 65: 2–18.
- Walkley A, Black I.A (1934).** An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-37.
- Wallbrink P.J., Murray A.S. (1993).** Use of fallout nuclides as indicators of erosion processes, *Hydrol. Process.* 7:297–304.
- Wallbrink P.J., Murray A.S. (1996b).** Determining soil loss using the inventory ratio of excess Lead-210 to Cesium-137, *Soil Science Society of America Journal*, 60, 1201-1208.
- Walling D.E (1983).** The sediment delivery problem, *J. Hydrol.* 65 209-237.
- Walling D.E., HE Q., Quine T. (1995).** Use of caesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigation, *IAHS Publ.* 229 163–172.
- Walling D.E., He Q., Quine T.A. (1996).** Use of fallout radionuclide measurements in sediment budget investigations, *Géomorphologie*, 3, 17-28.
- Walling D.E., Quine T.A (1990).** Use of caesium-137 to investigate patterns and rates of soil erosion on arable fields. *Soil Erosion on Agricultural Land* 33-53.
- Walling D.E., Quine T.A. (1993)** Use of ¹³⁷Cs as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the ¹³⁷Cs technique. Report to the UK Overseas Development Administration, Exeter, UK.
- Walling D.E., Quine T.A. (1995).** The use of fallout radionuclide measurements in soil erosion investigations. In: IAEA (Ed.), Nuclear Techniques in Soil-Plant Studies for Sustainable Agriculture and Environmental Preservation. Proc. FAO/IAEA Int.Symp. Vienna, October 17-21, 1994. *IAEA Proc.Series STI/PUB/947*, Vienna, Austria 597–619
- Walling D.E., Webb B.W., Woodward J.C. (1992).** Some sampling considerations in the design of effective strategies for monitoring sediment-associated transport. In: Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins, Proceedings of the Oslo Symposium, Août 1992, *I.A.H.S. Publication n°210*, 279-288.

- Walling DE, Russell MA, Hodgkinson RA, Zhang Y. (2002).** Establishing sediment budgets for two small lowland agricultural catchments in the UK. *Catena*; 47: 23–353.
- Walling, D. E. and He, Q. (1999).** Using fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land. *Soil Sci. Am. J.* 63:1404-1412
- Walling, D. E., Zhang, Y., and He, Q. (2011).** Models for deriving estimates of erosion and deposition rates from fallout radionuclide (caesium-137, excess lead-210, and beryllium-7) measurements and the development of user friendly software for model implementation, in: *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*, 11–33.
- Ward, J., Connor, J.D., Hatton MacDonald, D. (2008).** Designing tradable credit policy for diffuse source salinity ex ante. *Society and Natural Resources* 21 (10), 930–943.
- Wazzeni, M. (2013).** Quantification de l'érosion au niveau du bassin versant du lac collinaire Dékikira: Gouvernorat de Kairouan. *Projet de Fin d'Etudes. Spécialité Génie Rural, Eaux et Forêts; option Hydraulique et Aménagement Rural. Département GREF. INAT. Juin 2013*, 67p.
- Wennink B., Dagbenonbakin G., Agossou V. (2000).** Cotton farming in northern Benin and mixed farming in southern Benin. In Budelman, A., Defoer T., (éds.). *PLAR and resource flow analysis in practice case studies from Benin, Ethiopia, Kenya, Mali and Tanzania Part 2*. Royal Tropical Institute Amsterdam, The Netherlands. Pp 143-192.
- Willaine P. (1962).** Les sols du Danhomey. *OSTOM*. 46p.
- William J.R., Keith R., Richards S.B., Hook A. (1993).** Soil characteristics and process critical to the sustainable use of grasslands in arid, semi-arid and seasonally dry environments, in Baker (éd. 1993):pp.488-503.
- Williams J.R. (1975).** Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In “Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources”.
- Williams J.R. (1985)** .The EPIC model: an overview. In: *Proceedings of the Natural Resources Modelling Symposium*, ed. par D.G. Decoursey, Pingree Park, U.S.D.A., 353-357.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1978)** Predicting Rainfall Erosion Losses A Guide to Conservation Planning. United States. Department of Agriculture, Agricultural Handbook 537. U.S. Government Printing Office, Washington D.C, USA.
- Wischmeier W.H., Smith D.D. (1960).** A Universal Soil Loss Estimating Equation to Guide
- Wood S., Sebastian K. Scherr S.J. (2000).** Pilot analysis of global ecosystems: agroecosystems. Washington, DC: World Resources Institute and International Food Policy Research Institute.

- Woyessa Y.E., Bennie A.T.P. (2004).** Factors affecting runoff and soil loss under simulated rainfall on a sandy Bainsvlei Amalia soil, *South African Journal of Plant and Soil*, 21:4, 203-208. DOI:10.1080/02571862.2004.10635050.
- Yalin M.S. (1980).** Mechanics of sediment transport, Pergamon Press, Oxford.
- Yang, I., Zheng, H., chen, X.et Shen, L.(2013).** Effects of tillage practices on nutrient loss and soil bean growth in red – soil slope farmland. *International soil and water conservation Research* 1(3): 49-55
- Yann, A.B., (2008).** Dégradation des sols à Madagascar. [www.goodplanet.info/goodplanet/index.php/fre/pollutions/sols/degradation-des-sols/\(theme\)/1662](http://www.goodplanet.info/goodplanet/index.php/fre/pollutions/sols/degradation-des-sols/(theme)/1662). Consulté le 28/10/2015.
- Younsi S. (2015).** Etude de l’envasement de quelques lacs colinéaires au bassin versant de la Medjerda. Mémoire d’ingénieur Institut National Agronomique de Tunisie, 105p.
- Yuan Y., Jiang Y., Taguas E.V., Mbonimpa E.G., Hu W. (2015).** Sediment loss and its cause in Puerto Rico watersheds. *SOIL* 1, 595–602.
- Zapata F. (2002).** Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht. 219pp.
- Zoungrana C. (2004).** Adoption des techniques de conservation des sols et lutte contre la pauvreté au Yatenga. Mémoire de D.E.A. Université de Ouagadougou, UFR/SEG, 76p.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE-----	i
AVANT-PROPOS-----	ii
REMERCIEMENTS-----	iii
SOMMAIRE-----	v
LISTE DES SIGLES, ACRONYMES ET ABREVIATIONS -----	vii
LISTE DES TABLEAUX -----	x
LISTE DES FIGURES -----	xii
RESUME-----	xvii
ABSTRACT-----	xviii
INTRODUCTION GENERALE -----	1
1- Problématique -----	1
2- Description de la zone d'étude-----	5
3- Structuration de la thèse-----	10
CHAPITRE 1 : ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES PRATIQUES CULTURALES ET LA DEGRADATION DES SOLS -----	13
1-1- Opérationnalisation des concepts-----	13
1-1-1- Terre de Barre -----	13
1-1-2- Dégradation du sol-----	13
1-1-3- Pratiques culturelles -----	14
1-1-4- Bassin versant-----	15
1-2- Pratiques culturelles et dégradation du sol -----	16
1-2-1- Usage des engrais minéraux -----	16
1-2-2- Usage des engrais organiques et plantes améliorantes-----	17
1-2-3- Usage des pesticides-----	19
1-3- Pratiques culturelles et érosion hydrique du sol -----	19
1-3-1- Manifestations de l'érosion hydrique -----	20
1-3-1-1- Détachement des particules-----	20
1-3-1-2- Transport des particules -----	22
1-3-1-3- Sédimentation -----	23
1-3-2- Différentes formes d'érosion hydrique -----	24
1-3-3- Influence des pratiques culturelles sur l'érosion du sol -----	25
1-4- Pratiques culturelles et érosion éolienne -----	26
1-5- Evaluation de l'érosion hydrique -----	27
1-5-1- Mesures directes-----	27
1-5-1-1- Mesures topographiques -----	27
1-5-1-2- Mesures par parcelles sous pluies naturelles -----	27
1-5-1-3- Mesures par simulation de pluie-----	28
1-5-1-4- Mesures par l'étude de transport de solide -----	29
1-5-1-5- Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues-----	29

1-5-2- Mesures indirectes -----	29
1-5-2-1- La modélisation -----	29
1-5-2-2- La télédétection et le Système d'Information Géographique (SIG) -----	32
1-5-2-3- Utilisation des radionucléides -----	33
CHAPITRE 2 : LES PRATIQUES CULTURALES ET LA DEGRADATION DU SOL --	38
2-1- Contexte -----	38
2-2- Méthodes -----	40
2-3- Résultats -----	44
2-3-1- La perception des agriculteurs sur la dégradation du sol -----	44
2-3-1-1- Caractéristiques des agriculteurs -----	44
2-3-1-2- Perception des agriculteurs sur la dégradation du sol -----	46
2-3-1-3- Appréciation de la productivité du sol par les agriculteurs -----	48
2-3-1-4- Causes de la baisse de la productivité des sols -----	51
2-3-1-5- Perception des agriculteurs sur les causes de la perte de terre -----	53
2-3-2- Les pratiques culturales sur les bassins versants -----	55
2-3-2-1- Les pratiques culturales -----	55
2-3-2-2- Les déterminants de l'adoption des pratiques culturales -----	60
2-4- Discussion -----	63
2-5- Conclusion partielle -----	68
CHAPITRE 3 : ETAT DE LA DEGRADATION DU SOL -----	69
3-1- Etat de la dégradation des sols travers leurs caractéristiques -----	69
3-1-1- Contexte -----	69
3-1-2- Méthodologie -----	70
3-1-2-1- Sites d'études -----	70
3-1-2-2- Méthodes de collecte des données -----	75
3-1-2-3- Analyse statistique des données -----	78
3-1-3- Résultats -----	78
3-1-3-1- Profil du sol -----	78
3-1-3-2- Densité apparente et biomasse aérienne du sol e long des transects -----	82
3-1-3-3- Propriétés chimiques et biologiques du sol -----	85
3-1-4- Discussion -----	93
3-2- Etat de la dégradation du sol à travers les techniques de retombées radionucléides ---	94
3-2-1- Contexte -----	94
3-2-2- Méthodologie -----	96
3-2-3- Résultats -----	104
3-2-3-1- Activités de référence des sites -----	104
3-2-3-2- Inventaire et ditribution des radioéléments dans les profils du sol -----	104
3-2-3-3- Evaluation du taux de redistribution du sol à partir des radioéléments -----	107
3-2-4- Discussion -----	108
3-3- Conclusion partielle -----	109

CHAPITRE 4 : EFFET DES PRATIQUES CULTURALES SUR LA DEGRADATION DES SOLS -----	111
4-1- Effet des pratiques culturales sur la réduction de l'érosion-----	111
4-1-1- Contexte -----	111
4-1-2- Méthodes -----	113
4-1-3- Résultats -----	115
4-1-3-1- Propriétés physico-chimiques du sol -----	115
4-1-3-2- Ruissellement et perte de terre-----	116
4-1-3-3- Perte d'éléments nutritifs -----	122
4-1-4- Discussion -----	142
4-2- Effet des pratiques de conservation des sols et des eaux sur la productivité du maïs --	144
4-2-1- Contexte -----	144
4-2-2- Méthodes -----	145
4-2-3- Résultats -----	147
4-2-3-1- Bassin versant de Govié-----	147
4-2-3-2- Bassin versant de Lokogba -----	156
4-2-3-3- Bassin versant de Linsinlin-----	165
4-2-4- Discussion -----	175
4-3- Conclusion partielle-----	175
CHAPITRE 5 : DISCUSSION GENERALE -----	177
5-1- Rappel des questions et des hypothèses de recherches -----	177
5-2- La perception des agriculteurs sur la dégradation du sol -----	178
5-3- Les pratiques culturales des agriculteurs sur les bassins versants -----	179
5-4- Etat de la dégradation du sol -----	180
5-5- Le travail du sol et le mulching dans la lutte contre la dégradation du sol -----	182
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES -----	183
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	186
TABLE DES MATIERES -----	220
ANNEXES-----	223

ANNEXE I : Activités scientifiques

Articles publiés dans les revues scientifiques

- Kouelo A. F.**, Badou A., Houngnandan P., Francisco Merinosy M. F., Gnimassoun C. J.B. et Sochime, D. J. (2012): Impact du travail de sol et de la fertilization minérale sur la productivité de *Macrotyloma geocarpum* (Harms) Maréchal & Baudet au centre du Bénin. *Journal of Applied Biosciences* 51 :3625-3632.
- Kouelo A. F.**, Houngnandan P., Gerd D., (2013): Contribution of seven legumes residues incorporated into soil and NP fertilizer to maize yield, nitrogen use efficiency and harvest index in degraded soil in centre of Benin. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 7(6): 2468-2489.
- Kouelo F.A.**, Houngnandan P., Azontondé H.A., Benmansour M., Rabesiranana N., Mabit L. (2015). Assessment of the level of soil degradation in three watersheds affected by intensive farming practices in Benin. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences* 3 (6): 529-540.
- Kouelo F.A.**, Houngnandan P., Azontondé H.A., Dedehouanou H., Gangnon S.O.A. (2015). Farmers' Perception on Soil Degradation and Their Socioeconomic Determinants in Three Watersheds of Southern Benin. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare* 5 (22): 29-39.
- J. Avakoudjo, **A. F. Kouelo**, V. Kindomihou, K. Ambouta, B. Sinsin (2015). Effet de l'érosion hydrique sur les caractéristiques physicochimiques du sol des zones d'érosion (dongas) dans la Commune de Karimama au Bénin. *Agronomie Africaine* 27 (2) : 127 - 143.
- Zoundji C.C., Houngnandan P., Amidou M.H., **Kouelo F.A.** and Toukourou F. (2015). Inoculation and Phosphorus application effects on soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] productivity grown in farmers' fields of Benin. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 25(5) 1384-1392 FI₂₀₁₅= 0,448.
- Zoundji, CC., Houngnandan, P., **Kouelo, F.**, Boko, F., Adu-Gyamfi, JJ. (2015). Symbiotic nitrogen fixation and nitrogen budget of Brazilian soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] varieties introduced in Benin using ¹⁵N isotopic dilution method. *African Journal of Agricultural Research*, 11 (1): 7-15; FI₂₀₁₅ = 0,26.
- Didagbé O.Y., Houngnandan P., Sina H., Zoundji C.C., **Kouelo F.A.**, Lakou J., Toukourou F., Baba- Moussa L. (2015). Response of Groundnut (*Arachis hypogaea* L.) to exogenous *Bradyrhizobium* sp strains inoculation and phosphorus supply in two agro-ecological zones of Benin, West Africa. 2014. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences* 2 (6): 623-633.

Kouelo A. F., Houngnandan P., Dedehouanou H., Tossou R., Bello O. D., Bekou K. A. J., Tchétangni Y. A. (2016). Soil conservation practices in three watersheds of Benin: Farmer's cropping systems characterization. *African Journal of Agricultural Research*, 11 (7): 507-515; FI₂₀₁₅ = 0,26.

Articles en cours de publications dans les revues scientifiques

Kouelo, A. F., Houngnandan, P., Azontondé, H. A., Benmansour, M., Bekou, A.K.J., Akplo, T. M. Effet des pratiques de conservation de sol sur la productivité du maïs dans le bassin versant de Lokogba au Bénin. En cours de publications dans le journal : *Agronomie Africaine*.

Kouelo, A. F., Houngnandan, P., Azontondé, H. A. Assessment of rainfall erosion of degraded ferrallitic soil under tillage and mulching practices on three watersheds in southern Benin. En cours de publications dans le journal : *Applied and Environmental Soil Sciences*.

Articles à soumettre pour publications dans les revues scientifiques

Kouelo, A.F., Houngnandan, P., Dedehouanou, H., Azontondé, H.A., Igué, A. Social and demographic determinants of farmer's practices adoption in three watersheds of southern Benin.

Kouelo, A.F., Houngnandan, P., Benmansour, M., Mabit, L., Rabesiranana, N., Azontondé, H.A., Akplo, T.M., N'diath, A. The use of excess lead-210 and caesium-137 measurements for assessing long and short term soil erosion rates on three watersheds in southern Benin.

Kouelo, A.F., Houngnandan, P., Azontondé, H.A., Benmansour, M., Mabit, L., Rabesiranana, N. Effect of tillage and mulching on soil nutrients loss by water erosion in three watersheds of southern Benin.

Kouelo, A.F., Houngnandan, P., Azontondé, H.A., Akplo, T.M., Zanzo, S., Bossou, R.L., Zountangni, N. Improvement of maize growth and yields under tillage, mulching and nitrogen effect in the watershed of Linsinlin, southern Benin.

Kouelo, A.F., Houngnandan, P., Azontondé, Alohoutadé, M., Ahoglé, A. Effect of tillage, mulching and nitrogen on maize yields, N uptake and harvest index on the watershed of Govié, southern Benin.

Thèses/Mémoires

Kouelo, A. F. (2011) : Pratiques de gestion de la fertilité des bas-fonds rizicoles de la commune de Dassa-zoumè. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), 103p.

Kouelo, A. F. (2004) : Etude comparée de la contribution de sept légumineuses herbacées à l'amélioration de la production du maïs et des caractéristiques chimiques du sol. Thèse d'Ingénieur Agronome, 151p.

Participation aux colloques et ateliers scientifiques

Septembre-Octobre 2015 : Participation au 5ème Colloque des Sciences, Cultures et Technologies de l'Université d'Abomey-Calavi, du 28 Septembre au 03 Octobre 2015 sur le campus d'Abomey-Calavi, Bénin.

Septembre 2013 : Participation au 4ème Colloque des Sciences, Cultures et Technologies de l'Université d'Abomey-Calavi, du 23 au 28 Septembre 2013 sur le campus d'Abomey-Calavi, Bénin.

Octobre, 2012 : Participation à la conference internationale de la Gestion Intégrée de la Fertilité des Sols en Afrique (Integrated Soil Fertility Management in Africa : from Microbes to Markets ») à Nairobi au Kenya.

Décembre, 2007 : Participation la 4^{ème} Atelier Scientifique de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) à DassaZoumè, Bénin.

ANNEXE 2

Fiche d'enquête

Enquêteur : _____/Date d'enquête : _____/
 Numéro de fiche : _____/
 Commune : _____/ Arrondissement : _____/
 Village : _____/

A- Caractéristiques du village d'enquête

Variables	Codes	Réponses
1- Accessibilité du village	1= route bitumée ; 2= route carrossable ; 3= sentier ; 4= piste non carrossable	
2- Etat de la voie d'accès au village	1=bon état toute l'année, 2=mauvais état pendant la saison pluvieuse ; 3=mauvais état toute l'année ; 4- autre (à préciser)	
3- Distance du village au marché périodique le plus proche	1= ≤5 km ; 2= 5-10 km ; 3= 10-15 km ; 4=15-20 km ; 5= ≥20 km	
4- Topographie des champs	0= Terrain plat ; 1= Pente douce; 2= Pente moyenne, 3= Pente élevée	

B- Identification et caractéristiques socio-démographiques de l'enquêté

1- Nom du producteur		
2- Sexe du producteur	0= Féminin ; 1= Masculin	
3- Religion	0= animiste; 1= chrétien; 2= musulman; 4= autre (à préciser)	
4- Age		
5- Situation matrimoniale	1= célibataire ; 2= marié ; 3= divorcé ; 4= veuf (ve) ; 5=autre (à préciser)	
6- Niveau d'instruction	0= aucun ; 1= primaire ; 2= secondaire ; 3= Formation professionnelle ; 4= autre (à préciser)	
7- Alphabétisation	0= non alphabétisé ; 1= alphabétisé	
8- Groupe socio-culturel		
9- Type de ménage	1= autochtone, 2=allochtone	
10- Position sociale dans le ménage	1=Chef ménage ; 2=Fils dans le ménage ; 3= Autres (à préciser)	
11- Activités du chef de ménage	1=Agriculture ; 2= Elevage ; 3= Commerce ; 4= Chasse ; 5= Autres (à préciser)	
12- Etes-vous membre d'une organisation paysanne	1= Oui (préciser le nom et la date d'adhésion) ; 2= non	

13- Bénéficiez-vous d'encadrement	0= non ; 1= Etat (CeCPA, INRAB) ; 2=Projet d'Etat ; 3=Institution (à préciser) ; 4=ONG	
14- Quel est le mode d'accès à la terre ?	1=héritage ;2=don ;3=achat ;4=gage ;5=métayage;6=location ;7=Autres (à préciser)	

C- Principales cultures du ménage

Spéculations agricoles	Superficie (ha ou unité paysanne)	Rang selon la contribution au revenu du ménage	Rang selon la rentabilité	Nature du sol

D- Main-d'œuvre

Questions	Codes	Réponse
1- Quelle est la source principale de main d'œuvre ?	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle ; 4= Autres (à préciser)	
2- Est-elle toujours disponible ?	1= oui ; 2= non	
3- D'où provient la main d'œuvre ?	1= village ; 2=arrondissement ; 3=commune ; 4= autre commune (à préciser)	
4- Type de main-d'œuvre pour la préparation du sol	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
5- Type de main-d'œuvre pour le semis	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
6- Type de main-d'œuvre pour les sarclages	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
7- Type de main-d'œuvre pour le traitement phytosanitaire	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
8- Type de main-d'œuvre pour la récolte	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
9- Type de main-d'œuvre pour le transport de la récolte	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	
10- Type de main-d'œuvre pour les activités post récoltes	1=familiale ; 2=salariée ; 3=entraide contractuelle; 4= Autres (à préciser)	

E- Dégradation du sol

Questions	Codes	Réponse
1- Comment expliquez-vous la dégradation du sol ?	1=baisse de la fertilité du sol ; 2=perte de terre ; 3= Autres (à préciser)	
2- Comment appréciez-vous le niveau de la fertilité du sol ? S'il y a plusieurs critères d'appréciation, classez par importance.	1= vitesse de croissance des plants ; 2= rendement obtenu ; 3= couleur de la végétation ; 4= Insectes indicateurs ; 5= plantes indicatrices ; 6= précédents culturels ; 7= autres (à préciser).	
3- Quelles sont les causes de la dégradation ? S'il y a plusieurs causes, classez par importance.	1= déforestation ; 2=culture itinérante sur brûlis ; 3=culture continue ; 4= érosion ; 5= destruction du couvert végétal ; 6= labour ; 7= feux de brousse ; 8= piétinement animal ; 9= engrais chimique ; 10= pesticides ; 11= autres (à préciser)	
4- Quelles sont les causes de l'érosion ? S'il y a plusieurs causes, classez par importance.	1=pente ; 2=intensité de la pluie ; 3= durée de la pluie ; 4= type de sol ; 5= perméabilité du sol ; 6= ruissellement ; 7= labour ; 8= piétinement ; 9= destruction du couvert végétal ; 10= autres (à préciser)	
5- Comment préparez-vous le sol de vos champs ?	1=défrichement et brûlis ; 2=défrichement sans brûlis (ramassage des friches) ; 3=défrichement et incorporation des friches par le labour ; 4= Autres (à préciser)	
6- Quel type de labour faites-vous ?	0 = semis direct (sans labour) ; 1= minimum labour (remuer le point de semis) ; 2= billonnage ; 3 = labour à plat ; 4 = autres (à préciser)	
7- Si vous faites le billonnage, comment orientez-vous les billons ?	0 = sans orientation précise (varie suivant la saison et la main d'œuvre) ; 1= parallèle à la pente ; 2=perpendiculaire à la pente ; 3=autres (à préciser)	

8- Connaissez-vous le mulching ?	1 = oui ; 2 = non	
9- Comment le savez-vous ?		
10- Le pratiquez-vous ?	1 = oui ; 2 = non	
11- Si oui, depuis quand ?	1 = $\leq$ 2ans ; 2 = 2-5 ans ; 3 = 5-10 ans ; 4 = $>$ 10 ans	
12- Comment appliquez-vous le mulch ?		
13- Quels avantages avez-vous tiré du mulching ?		
14- Quelles sont vos contraintes dans cette pratique ?		
15- Accepterez-vous continuer cette pratique ?	1 = oui ; 2 = non	

F- Gestion de la fertilité

Questions		Codes	Réponse
1- Quels sont les types d'engrais que vous utilisez ?		0=aucun ; 1=minéral ; 2=organique ; 3=organique et minéral	
Engrais minéraux			
2- Citer les engrais minéraux que vous utilisez		1= NPK ; 2= Urée ; 3=KCl ; 4=SSP ; 5=TSP ; 6=Autre (à préciser)	
3- Quelles sont les techniques d'application ?		1=Poquet ouvert ; 2=Dépôt direct sur le sol ; 3= poquet fermé ; 4= Raie	
4- A quelle distance se situent les engrais par rapport aux plants ?		1= ≤ 5 cm ; 2= 5-10 cm ; 3= ≥ 10 cm	
5-Quels sont les engrais appliqués avant ou au début du semis ?		1= NPK ; 2= Urée ; 3=KCl ; 4=SSP ; 5=TSP ; 6=Autre (à préciser)	
6- Quelle est la période d'application des engrais ?		1= 2 semaines après sarclage (SAS) ; 2= 3SAS ; 3=4SAS ; 4= autre (à préciser)	
7- Quelles sont les sources d'approvisionnement ?			
8- Fractionnez-vous l'apport d'engrais ?	NPK	1 = 2 apports ; 2 = 3 apports ; 3 = plus de trois fractions	
	Urée	1 = 2 apports ; 2 = 3 apports ; 3 = plus de trois fractions	
	KCl	1 = 2 apports ; 2 = 3 apports ; 3 = plus de trois fractions	
	autre (à préciser)	1 = 2 apports ; 2 = 3 apports ; 3 = plus de trois fractions	
9- Quelles sont les doses des différents engrais minéraux ?	NPK		
	Urée		
	KCl		
	autre (à préciser)		
Engrais organiques			
10- Citer les engrais organiques que vous utilisez		1=compost; 2=déjections animales; 3=ordures ménagères; 4=résidus de récolte ; 5=autre (à préciser)	

11- Quelles sont les techniques d'application ?		1=Enfouissement ; 2=Couverture du sol; 3=poquet; 4= autre (à préciser)	
12- Quelle est la période d'application des engrais ?		1= Avant préparation du sol ; 2= Après la récolte ; 3= Après le labour ; 4= Autre (à préciser)	
13- Quelles sont les sources d'approvisionnement ?			
14- Quelles sont les doses des différents engrais organiques ?	Compost		
	Déjections animales		
	Ordures ménagères		
	Autre (à préciser)		

G- Système de jachère

Question	Codes	Réponses
1- Après combien de temps d'exploitation abandonnez-vous les terres mises en exploitation ?	0 = culture continue 1= 1-5 ans ; 2=5- 10 ; 3=10- 15 ans ; 4=> 15 ans	
2- Quelle est la superficie totale des champs que vous avez actuellement en jachère ?		
3- Après combien d'année revenez-vous exploiter les terres mises en jachère ?	1=2 ans ; 2=2- 5 ans ; 3= 5- 10 ans ; 4= > 10 ans	
4- Est-ce les mêmes tendances il y a quelques années?	0=non ; 1= oui	
5- Si non (à la question 4) quelle est la situation actuelle ?		
6- Qu'est ce qui explique ce changement dans la durée de la jachère ?		

H- Gestion maladies et ravageurs

Questions		Codes	Réponse
1- Etes-vous confronté aux dégâts des ravageurs ?		1=oui ; 2=non	
2- Quels sont ces ravageurs ?		1= chenilles roses ; 2= chenilles blanches ; 2=mouches ; 3= moucheron ; 4=termites ; 5= oiseaux ; 6=Plantes adventices ; 7 = Autre (à préciser)	
3- Quels sont les symptômes qui vous indiquent la présence des ravageurs ou maladies ?			
4- Quelles sont les mesures préventives que vous utilisez contre les ravageurs ?		0 = aucune ; 1 = Propreté du champ ; 2= Propreté des alentours du champ ; 3= Bandes de plantes pièges ; 4= Autre (à préciser)	
5- Quels sont les types de pesticides que vous utilisez ?		0=aucun ; 1=insecticide ; 2=herbicide ; 3=fongicides ; 4=autre (à préciser)	
Insecticides			
6- Citer les différents insecticides que vous utilisez			
7- Quelles sont les techniques d'application ?		1= pulvérisation ; 2= arrosage ; 3=poudrage ; 4=autre (à préciser)	
8- Quelles sont les sources d'approvisionnement ?		1=CeCPA ; 2= INRAB ; 3= Projet ; 4= ONG ; 5 = autre (à préciser)	
9- Quelle est le nombre d'application ?			
10- Donner la période de chacune des	Application	Dose	
	1 ^{ère}		
	2 ^{ème}		
	3 ^{ème}		
	4 ^{ème}		

applications et la dose				
Herbicides				
11- Citer les différents herbicides que vous utilisez				
12- Quelles sont les techniques d'application ?	1= pulvérisation ; 2= arrosage ; 3=poudrage ; 4=autre (à préciser)			
13- Quelles sont les sources d'approvisionnement ?	1=CeCPA ; 2= INRAB ; 3= Projet ; 4= ONG ; 5 = autre (à préciser)			
14- Quelle est la période d'application ?	1=avant semis ; 2=floraison des adventices ; 3=avant floraison des adventices ; 4=stade de 2-3 feuilles des adventices ; 5= autre (à préciser)			
15- Quelle est la dose d'application ?				

ANNEXE 3

Tableau 1: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur la croissance des plants du maïs à Govié.

Facteurs d'étude	Vitesse de croissance	Diamètre au collet	Surface foliaire	Nombre de feuilles
Probabilité au seuil de 5%				
Labour	0,0002	0,625	0,0022	0,7169
Mulching	0,0003	0,0407	0,0002	0,8845
Azote	<.0001	0,0009	<.0001	0,5626
Labour vs Mulch	0,2663	0,1729	0,6166	1,0000
Labour vs Azote	0,8	0,48	0,3344	0,2518
Mulching vs Azote	0,2047	0,7192	0,1239	0,4274
Labour vs Mulch vs Azote	0,9886	0,9124	0,4223	0,3496

Tableau 2: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur la productivité du maïs à Govié.

Facteurs d'étude	Rendement Grains	Rendement Rafles	Rendement Spathes	Rendement Biomasse	Indice de récolte
Probabilité au seuil de 5%					
Labour	0,0010	0,0012	0,0354	0,0096	0,4625
Mulching	0,0003	0,0003	0,1131	0,0283	0,2076
Azote	< 0,0001	< 0,0001	0,0013	0,1203	0,0029
Labour vs Mulch	0,6561	0,1932	0,7845	0,5663	0,3949
Labour vs Azote	0,2533	0,1841	0,3326	0,4980	0,7322
Mulching vs Azote	0,0957	0,0578	0,3386	0,6554	0,2635
Labour vs Mulch vs Azote	0,2438	0,1694	0,7869	0,4823	0,6271

Tableau 3: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur l'accumulation en azote du maïs à Govié

Facteurs d'étude	Azote grains	Azote Raffles	Azote Spathes	Azote Biomasse	Taux d'azote grains
Probabilité au seuil de 5%					
Tillage	0,0012	0,001	0,0076	0,0014	0,9954
Mulching	0,0006	<0.0001	0,0071	0,0015	0,8696
Azote	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0,001	0,0544
Tillage vs Mulching	0,5133	0,0752	0,9432	0,2998	0,4082
Tillage vs Azote	0,1421	0,0872	0,2021	0,7464	0,4040
Mulching vs Azote	0,0692	0,0186	0,2116	0,965	0,1764
Tillag vs Mulchin vs Azote	0,1770	0,0639	0,4376	0,4735	0,6016

Tableau 4 : Effet des facteurs simples et de leurs interactions sur les performances agronomiques du maïs exprimé en probabilité au seuil de 5% ($Pr < 0,05$) à Lokogba.

Paramètres	Labour	Mulching	Labour x Mulching
Diamètre au collet	0,8493	0,2366	0,7159
Nombre de Feuilles /plant	0,5404	0,5813	0,9771
Indice Foliaire	< 0,0001	< 0,0001	0,025
Vitesse de croissance	< 0,0001	< 0,0001	0,0291
Rendement Grains	< 0,0001	< 0,0001	0,8752
Rendement Rafles	0,0224	0,0031	0,7544
Rendement Spathes	0,0003	< 0,0001	0,7817
Rendement Paille	0,0232	0,2556	0,7940
Indice de Récolte	0,1229	0,0029	0,5936

MS : Matière Sèche ; cm : centimètre ; j : jour ; kg : kilogramme ; ha : hectare ; % : pourcent

Tableau 5: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur l'accumulation en azote dans les composantes de rendement du maïs à Lokogba

Facteurs d'étude	Azote grains	Azote Raffles	Azote Spathes	Azote Biomasse	Taux d'azote grains
Labour	0,0006	0,0383	0,0006	0,0132	0,3787
Mulching	<0,0001	0,0007	<0,0001	0,0276	0,0045
Labour vs Mulching	0,5103	0,6909	0,6314	0,6741	0,5392

Tableau 6: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur la croissance des plants du maïs à Linsinlin.

Facteurs d'étude	Vitesse de croissance	Nombre de feuilles	Diamètre au collet	Indice foliaire
Probabilité au seuil de 5%				
Labour	0,9332	0,3525	0,3838	0,8712
Mulching	0,4607	0,2029	0,2432	0,1984
Azote	0,1852	0,3054	0,2867	0,4973
Labour vs Mulching	0,8847	0,4915	0,4221	0,6359
Labour vs Azote	0,9428	0,4172	0,2581	0,5684
Mulching vs Azote	0,3403	0,4741	0,4579	0,7822
Labour vs Mulching vs Azote	0,6749	0,3165	0,2458	0,802

Tableau 7: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur les composantes de rendement du maïs à Linsinlin.

Facteurs d'étude	Rendement Grains	Rendement Rafles	Rendement Spathes	Rendement Biomasse	Indice de récolte
Probabilité au seuil de 5%					
Labour	0,0478	0,0622	0,5139	0,0243	0,1392
Mulching	0,0814	0,2255	0,6832	0,0418	0,5766
Azote	0,0003	0,0005	0,0374	0,0139	0,0724
Labour vs Mulching	0,8441	0,735	0,5857	0,875	0,8527
Labour vs Azote	0,488	0,6693	0,734	0,02	0,1052
Mulching vs Azote	0,8503	0,5114	0,3423	0,5156	0,4046
Labour vs Mulching vs Azote	0,7767	0,6141	0,4911	0,4865	0,7898

Tableau 8: Effet des facteurs simples et de leur interaction sur l'accumulation en azote dans les composantes de rendement du maïs à Linsinlin

Facteurs d'étude	Azote grains	Azote Raffles	Azote Spathes	Azote Biomasse	Taux d'azote grains
Probabilité au seuil de 5%					
Labour	0,0579	0,2517	0,6009	0,1405	0,1697
Mulching	0,0469	0,3902	0,5698	0,0713	0,4218
Azote	0,0002	0,0014	0,0462	0,006	0,0941
Labour vs Mulching	0,8667	0,7046	0,6091	0,9819	0,9886
Labour vs Azote	0,5062	0,9338	0,7319	0,0599	0,1222
Mulching vs Azote	0,6432	0,5971	0,3323	0,5616	0,5289
Labour vs Mulching vs Azote	0,7794	0,8172	0,548	0,5902	0,9027

Biographie de l'auteur

Félix KOUÉLO ALLADASSI est né le 20 avril 1977 à Hounto dans la commune d'Agbangnizoun au Bénin. Il a effectué ses études primaires et secondaires de 1984 à 1997 à la fin desquelles il a obtenu le Baccalauréat scientifique (Série D : Sciences et de la vie et de la terre). Il entra à la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Nationale du Bénin (Actuelle Université d'Abomey-Calavi) en 1997 où il a obtenu une attestation de réussite du Diplôme Universitaire d'Etudes Scientifiques 1ère année en Physique et Chimie en 1999. Admis au concours d'entrée à la Faculté des Sciences Agronomiques, il a effectué ses études agronomiques de 1999 à 2004 et a obtenu le Diplôme d'Agronomie Générale (DAG) en 2003 et le Diplôme d'Ingénieur Agronome en Sciences de sol, Option Production Végétale le 17 décembre 2004. En février 2005, il a été recruté Enseignant Contractuel au Lycée Agricole Médji de Sékou. En avril 2005 et plus tard en septembre 2010, il a bénéficié, chaque fois, d'un stage de trois mois dans le Laboratoire de Chimie et Physique Appliquée aux Sciences des Sols à l'Université de Gand en Belgique sur la minéralisation de l'azote, l'émission des gaz à effet de serre par les terres agricoles et l'utilisation des isotopes (^{15}N et ^{32}P) dans la gestion de la fertilité des sols. Recruté à la Fonction Publique et affecté à la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi en septembre 2007, il a été mis à la disposition du Laboratoire de Microbiologie des Sols et d'Ecologie Microbienne au poste d'Assistant de Recherche. Lauréat du projet néerlandais NPT 146 en 2008, il a obtenu en 2011 le Diplôme d'Etudes Approfondies en sciences de sol, Option Ressources Phytogénétiques et Protection des Cultures (RPPC) et a démarré sa thèse de Doctorat en 2012 avec une bourse nationale. Durant sa thèse, il a bénéficié d'une série de formation de courte durée pour renforcer sa capacité dans l'utilisation des techniques basées sur les retombées radionucléides (^{137}Cs , ^{210}Pb et ^7Be) en novembre 2012 au Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires (CNSTN) de Tunis en Tunisie, en mars 2013 au Laboratoire de Seibersdorf à Vienne en Autriche, en novembre 2013 à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) d'Antananarivo à Madagascar, en octobre 2014 à l'Institut de Recherche en Chimie des Sols d'Harare au Zimbabwe et en octobre 2015 au Centre National de l'Energie, des Sciences et Techniques Nucléaires (CNESTEN) de Rabat au Maroc. A travers ses activités de recherche, il a à son actif, à ce jour, neuf (09) publications scientifiques dans des revues internationales indexées et a un Facteur d'Impact dans le domaine de la

« Conservation des Sols et Evaluation des Terres ».

Il peut être contacté par e-mail adresse :

felix.kouelo@fsa.uac.bj; felix.kouelo@gmail.com.



Pr. Dr. Ir. Philippe LALEYE