



Les engrais verts et les cultures de couverture au Bénin - informations tirées de la revue littéraire, de l'évaluation agronomique et de la modélisation de la durabilité des systèmes de culture

Alliance



RESEARCH PROGRAM ON Livestock

The **Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT)** delivers research-based solutions that address the global crises of malnutrition, climate change, biodiversity loss, and environmental degradation.

The **Alliance** focuses on the nexus of agriculture, the environment, and nutrition. We work with local, national, and multinational partners across Africa, Asia, Latin America, and the Caribbean, and with the public and private sectors and civil society. Through novel partnerships, the Alliance generates evidence and mainstreams innovations to transform food systems and landscapes so that they sustain the planet, drive prosperity, and nourish people in a climate crisis.

The **Alliance** is part of the **Consultative Group for International Agricultural Research (CGIAR)**, the world's largest agricultural research and innovation partnership for a food-secure future, dedicated to reducing poverty, enhancing food and nutrition security, and improving natural resources.

<https://alliancebioversityciat.org> www.cgiar.org

CGIAR is a global research partnership for a food-secure future. CGIAR science is dedicated to reducing poverty, enhancing food and nutrition security, and improving natural resources and ecosystem services. Its research is carried out by 15 CGIAR Centers in close collaboration with hundreds of partners, including national and regional research institutes, civil society organizations, academia, development organizations, and the private sector.

www.cgiar.org

The University of Parakou. The University of Parakou is the second biggest national university after that of Abomey Calavi (in southern Benin) and is located north of Benin. Its mission focuses on training and education, developing capacity for the leaders of tomorrow for the needs of the economic, social, intellectual and cultural development of Benin and other nations. Furthermore, the University of Parakou participates in the development of scientific, fundamental and applied research, thereby boosting the national economy.

<http://www.univ-parakou.bj/>

INRAB. INRAB is the National Institute of Agricultural Research of Benin. Inrab implements the government's policy in the field of agricultural research through the production of information and appropriate technologies for the preservation of natural resources.

<https://inrab.org/>

ProSOL. Prosol is a Protection and Rehabilitation Project for Improved Food Security. It is one of the projects of the special initiative 'One world without hunger' (SEWoH) of the German Federal Ministry of Economic Cooperation and Development (BMZ). In Benin the project is operational in 18 municipalities of the department of Borgou, Alibori, Zou and Collines. ProSOL aims to implement sustainable approaches with a large impact to promote soil protection and the rehabilitation of degraded soils.

Les engrais verts et les cultures de couverture au Bénin - informations tirées de la revue littéraire, de l'évaluation agronomique et de la modélisation de la durabilité des systèmes de culture

Rodrigue V. Cao Diogo, Jonas A. D. Dossou, Firmin Amadji, Peter Bolo, Job Kihara, Mariette Gloria Gbedjissokpa, Rein van der Hoek, Michael Kinyua, Jessica Mukiri, Rolf Sommer, Jean Sibomana, Birthe Paul

Nairobi, août 2021



Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT) Africa Hub
c/o icipe (International Centre of Insect Physiology and Ecology)
Duduville Campus O Kasarani Road
P.O. Box 823-00621
Nairobi, Kenya
Telephone: (+254) 0709134000
Email: r.vanderhoek@cgiar.org
Website: <https://alliancebioiversityciat.org/>

Citation

Diogo, R.V.C., Dossou, J.A.D., Amadji, F., Bolo, P., Kihara, J., Gbedjissokpa, M.G., van der Hoek, R., Kinyua, M., Mukiri, J., Sommer, R., Sibomana, J., Paul, B.

About the authors

Birthe Paul, Farming Systems Scientist, Alliance of Bioversity International and CIAT, Nairobi, Kenya.

Firmin Amadji, Agronomist, Sol Consult Africa (SolCA), Bohicon, Benin.

Jessica Mukiri, Research Associate, Alliance of Bioversity International and CIAT, Nairobi, Kenya.

Job Kihara, Senior Scientist, Alliance of Bioversity International and CIAT, Nairobi, Kenya.

Jonas A. D. Dossou, Research Associate, Research Program on coconut tree, INRAB, Sèmè Podji, Benin.

Mariette G. Gbedjissokpa, Research Assistant, University of Parakou, Department of Science and Technique of Animal Production and Fisheries, Benin.

Peter Bolo, Research Associate, Alliance of Bioversity International and CIAT, Nairobi, Kenya.

Rein van der Hoek, Senior Scientist, Alliance of Bioversity International and CIAT, Turrialba, Costa Rica.

Rodrigue V. Cao Diogo, Crop-livestock Agronomist, Associate Professor, Faculty of Agronomy, University of Parakou, Benin. rodrigue.diogo@fa-up.bj

Rolf Sommer, Principal Scientist, Alliance of Bioversity International and CIAT, Nairobi, Kenya.

Remerciements

Ce rapport est le résultat du projet intitulé *Évaluation des avantages et des contraintes d'adoption des cultures de couverture en engrais verts au Bénin / en Éthiopie et au Kenya*, dirigé par le Centre International de l'Agriculture Tropicale (CIAT). Le projet est financé par le Ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement (BMZ) / Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) dans le cadre du contrat 81218508, numéro de traitement 14.0156.1-101.00. Le projet a été mené dans le cadre du programme de recherche sur l'eau, les terres et les écosystèmes (WLE) du CGIAR. Nous remercions tous les donateurs qui soutiennent notre travail à travers le monde par leurs contributions au système du CGIAR.

Le personnel pays et les partenaires du Programme Mondial GIZ sur la Protection et la Réhabilitation des Sols pour la Sécurité Alimentaire ont apporté un soutien indispensable à ce projet de recherche. Ils ont soutenu des visites sur le terrain, organisé des groupes de discussion, assisté à l'atelier des experts et contribué à la collecte de données. Au Bénin, ces personnes étaient Mélanie Djédjé, Kado Alphonse Simba, Fulgence Dotonhoué, et Ezechiél Tchorouwé (tous de GIZ ProSOL).

Nous remercions Abdèramane Baguidi Seidou et Samuel Agbankpleto, deux étudiants de la Faculté d'Agronomie de l'Université de Parakou, pour le travail ardu qu'ils ont déployé pour la collecte de données sur le terrain de l'évaluation agronomique. Merci à Alfousseni Sidibe de Live Your Dream pour la traduction des parties de ce document en Français.

Nous voudrions remercier Wilson Nguru du CIAT qui a cartographié les zones cibles de ce rapport. Nous souhaitons également remercier Moritz Reckling, chercheur post doctoral du Centre de Recherche sur le Paysage Agricole de Leibniz (ZALF), dont les travaux ont inspiré ce projet de recherche et dont les conseils ont fourni des indications précieuses pour la mise en place de la modélisation.

© CIAT 2021.

Some Rights Reserved. This work is licensed under a Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International License (CC-BY-NC) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Copyright © CIAT 2021. Some rights reserved.

November 2021

Résumé exécutif

Ce projet de recherche s’inscrit dans le contexte de l’étude des bénéfices et des contraintes de l’adoption des Cultures de Couverture et Engrais Verts (CCEV, en anglais GMCC : Green Manure Cover Crops) au Bénin et au Kenya. Il est lié au *Projet Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité Alimentaire* (ProSOL) de la GIZ au Bénin. L’objectif principal est d’aider à identifier les CCEV prometteurs pour leur intégration dans les systèmes de culture et d’évaluer leurs multiples bénéfices pour l’homme et l’amélioration des systèmes de production. Ainsi, cette étude comporte plusieurs parties : 1) une revue littéraire de l’état des lieux sur les avantages et contraintes d’adoption des CCEV ; 2) des expérimentations en milieu réel pour l’évaluation des avantages biophysiques des CCEV ; 3) l’évaluation des performances des systèmes de production des CCEV à l’aide de la modélisation.

Le but de la revue littéraire était de rassembler des connaissances sur le rôle des CCEV dans la protection et la réhabilitation des sols et d’identifier les obstacles à l’adoption par les petits exploitants agricoles. La revue identifie les agro-écologies et les systèmes agricoles dans les zones cibles, les projets passés et ceux en cours sur les CCEV au Bénin, leurs zones d’opération et le type de CCEV et de systèmes de culture impliqués. Il résume en outre la littérature sur le statut d’adoption et les contraintes possibles. La revue de littérature a permis de constater qu’au cours des deux dernières décennies, la majorité des travaux de recherche réalisés ont porté sur la description des propriétés physico-chimiques des sols et sur la fertilisation organo-minérale, alors que peu de travaux se sont focalisés sur les CCEV du fait d’une faible documentation des connaissances scientifiques par rapport à leurs effets. Les principales espèces CCEV promues étaient *Mucuna pruriens*, *Aeschynomene histrix*, *Stylosanthes hamata* et *guianensis*. D’autres cultures régulières, bien qu’elles aient été utilisées pendant longtemps comme cultures vivrières, présentent les attributs d’engrais verts qui permettent d’améliorer la fertilité du sol en fournissant une couverture au sol et/ou une fixation de l’azote, une biodiversité souterraine, une réduction de la pression exercée par les parasites et les maladies, et une augmentation de la matière organique et de la capacité de rétention en eau grâce à leurs résidus. *Cajanus cajan* (pois cajan), *Arachis hypogea* (arachides), *Glycine max* (soja) et *Vigna unguiculata* (niébé) sont des exemples de telles cultures. Il a été démontré à maintes reprises que les CCEV avaient une influence positive sur la production agricole et la fertilité des sols. Afin de continuer à les promouvoir, il est nécessaire de se concentrer sur la production de semences CCEV de qualité, qui devraient être facilement accessibles et abordables pour les agriculteurs. Aussi, il faudrait promouvoir le développement de nouvelles accessions de cultures de couverture légumineuses et graminées capables de tolérer les variabilités climatiques de différentes zones agro-écologiques et pouvant être utilisées dans différents systèmes d’utilisation des terres. Les CCEV doivent être compatibles avec les systèmes de culture, par exemple, le comportement de croissance (vertical, concurrence minimale pour la lumière et l’humidité) devrait convenir à l’utilisation en culture intercalaire. L’introduction de CCEV favorables aux utilisations multiples encourage l’adoption par les agriculteurs, car ils peuvent être utilisés pour améliorer les sols, protéger les cultures, et nourrir les animaux. La caractérisation économique (traitement après récolte, commercialisation) et l’identification de niche pour les CCEV devraient également faire partie des recherches futures.

Les expérimentations en milieu réel ont été réalisées avec 51 agriculteurs sur le maïs et 41 pour le coton sur des parcelles avec ou sans précédent de CCEV. L’évaluation a été conduite dans quatre villages d’intervention du ProSOL à raison d’un village par commune et par zone agroécologique (ZAE). La collecte de données a été faite dans les villages de Padé (commune de Kandi), Ina Gando (commune de Bembéréké) au nord du Bénin, Banon (commune de Bantè) et Doga Domè (commune Zagnanado) au centre du Bénin. L’évaluation de la fertilité chimique des sols chez l’ensemble de ces agriculteurs a permis de constater que les CCEV ont amélioré le pH, l’azote et la matière organique du sol en comparaison avec les parcelles n’ayant pas reçu de précédent de CCEV. En ce qui concerne la fertilité physique des sols, une amélioration de la compaction du sol a été déterminée sur les parcelles ayant reçu de précédent de CCEV par rapport aux parcelles sans CCEV ($p > 0,01$) à Zagnanado (centre) et à Bembèrèkè (nord) sur 10 et 15 cm. De plus, il a été noté que la conductivité hydraulique augmente de 33-51% sur les parcelles traitées aux CCEV au Centre contre 29-66% au nord comparativement aux parcelles sans CCEV. Ces résultats traduisent la grande infiltration de l’eau des parcelles amendées aux CCEV en comparaison aux parcelles sans CCEV. L’évaluation des effets précédents de CCEV sur le rendement des cultures montre qu’il existe des différences hautement significatives ($p < 0,000$) sur les deux spéculations maïs et coton étudiées. Le maïs sur parcelles sans CCEV sans apport d’engrais minéral a produit en moyenne 604 kg/ha et 1 686 kg/ha avec apport d’engrais (150kg de NPK + 50kg d’Urée par ha) contre 1 367 kg/ha avec CCEV seul et 2 550 kg/ha avec CCEV + (75kg de NPK + 25kg d’Urée)/ha. Sur le coton, les rendements obtenus étaient de 537 kg/ha sans apport et 1 343kg/ha avec 150kg de NPK + 50kg d’Urée, 949 kg/ha avec CCEV seul et 2 008 kg/ha sur précédent de CCEV avec un complément de 75kg de NPK +25kg d’Urée sur les quatre sites étudiés. Ces résultats montrent qu’avec seulement les CCEV, les rendements obtenus habituellement avec la pratique vulgarisée (150kg de NPK et 50kg d’Urée) sont presque égalés alors qu’un complément de 75kg de NPK + 25kg d’Urée permet d’améliorer d’au moins 500 kg/ha le rendement des deux cultures sur précédent de CCEV sans limitation d’eau. Les CCEV doivent être fortement vulgarisés pour intensifier la culture du maïs et du coton au Bénin

et réduire les coûts élevés des engrais minéraux. Leurs contraintes d’adoption doivent être relevées par une facilitation de la disponibilité en semence certifiée et une intégration des CCEV à usage multiple dans les systèmes de production des communautés locales.

L’évaluation de l’*Outil de Durabilité du Système de Culture* (CROSST : Cropping System Sustainability Tool) visait à rassembler les dimensions agro-environnementales et socio-économiques et à comparer et quantifier systématiquement les impacts et les avantages des systèmes avec et sans les CCEV. Pour les agriculteurs, adopter des CCEV et prendre des décisions éclairées en vue de les intégrer à leurs systèmes de culture nécessite une bonne compréhension des impacts multidimensionnels de ces cultures. CROSST est un outil basé sur Excel qui évalue les impacts agro-environnementaux et socio-économiques des technologies CCEV. L’outil examine la marge brute, la productivité (rendement), la santé du sol (équilibres N et P, structure du sol et carbone organique du sol), les heures de travail et les compromis entre ceux-ci. Nous avons appliqué CROSST à certaines zones d’intervention de la GIZ au Bénin pour illustrer ses fonctionnalités avec des résultats pilotes provenant des mêmes zones. Les données ont été recueillies lors de la revue de littérature, de groupes de discussion et d’entretiens avec des experts. Les résultats des évaluations agronomiques n’ont pu être intégrés au modèle, mais pourront être réalisés à l’avenir. Les premiers résultats indiquent que les CCEV améliorent la structure et la matière organique du sol ainsi que les bilans d’azote du sol dans les ZAE étudiées. Cependant, investir dans l’amélioration des sols peut entraîner une perte de rentabilité économique, en particulier dans les cas où une culture qui produit des céréales pour la consommation ou la vente est échangée contre une culture qui produit de la biomasse pour l’amendement du sol uniquement. Les petits exploitants ont tendance à vouloir atteindre plusieurs objectifs au lieu d’en maximiser un seul. CROSST doit encore affiner ses données d’entrées avec le recensement officiel récent ainsi que des mesures indépendantes sur le terrain.

CROSST pourrait à l’avenir être développé et validé pour servir d’outil d’aide à la décision pour le programme de gestion des sols de la GIZ, les partenaires d’exécution et les parties prenantes locales lorsqu’ils envisagent d’intégrer les CCEV aux systèmes de culture.

Mots clés: *Cajanus cajan*, coton, fertilité chimique, fertilité physique, maïs, *Mucuna*, rendement, Bénin, Afrique de l’Ouest.

Sommaire

Remerciements	v
Résumé exécutif	vi
Liste d'abréviations	xi
1. Introduction	1
Présentation du projet	2
2. Revue littéraire	3
2.1 Introduction	3
2.2 Localisation et zonage agro-écologique au Bénin	4
2.3 Promotion des espèces CCEV au Bénin	6
2.4 Fertilité des sols au Bénin	8
2.5 Systèmes d'exploitation au Bénin	9
2.6 GIZ et autres projets / programmes promouvant les CCEV au Bénin	10
2.7 Autres organisations travaillant sur les CCEV	12
2.8 Adoption des CCEV	13
2.9 Contraintes à l'adoption des CCEV	13
2.10 Conclusions de la revue littéraire	15
3. Évaluation agronomique : caractéristiques des systèmes d'exploitation et utilisation des CCEV	16
3.1 Présentation des communes	16
3.2 Identification et prise de contact avec les producteurs	17
3.3 Matériel utilisé	18
3.4 Résultats et discussion	21
4. Modélisation de l'Outil de Durabilité des Systèmes de Culture (CROSST)	27
4.1 Introduction	27
4.2 Matériel et méthodes	28
4.3 Systèmes de culture	31
4.4 Résultats	35
4.5 Conclusions de CROSST	39
5. Conclusions et recommandations	41
Références	43

Figures

Figure 1: Carte des zones agro-écologiques du Bénin	4
Figure 2: Zones d'intervention du programme ProSOL au Bénin.	10
Figure 3: Localisation des communes d'étude	17
Figure 4: Séance d'échange et d'installation des étudiants avec les producteurs de Bantè (à gauche) et de Zagnanado (à droite).	18
Figure 5: Dispositif des essais chez un producteur pour la culture de maïs.	19
Figure 6: Évolution de la compaction du sol sur 5, 10 et 15 cm en fonction des systèmes de culture au centre Bénin (Bantè et Zagnanado).	22
Figure 7: Évolution de la compaction du sol sur 5, 10 et 15 cm en fonction des systèmes de culture au Nord Bénin (Bembèrèkè et Kandi).	22
Figure 8: Évolution de la conductivité hydraulique (K, en cm/s) sur parcelles ayant reçu de précédent de plantes améliorantes (+CCEV/with GMCC) ou non (-CCEV/without GMCC) dans deux communes du nord Bénin (Bembèrèkè et Kandi).	23
Figure 9 : Évolution de la conductivité hydraulique (K, en cm/s) sur parcelles ayant reçu de précédent de plantes améliorantes (+CCEV/with GMCC) ou non (-CCEV/without GMCC) dans deux communes du centre Bénin (Bantè et Zagnanado).	23
Figure 10: Effets des précédents culturels et de la pratique paysanne sur le rendement du maïs au centre (Bantè & Zagnanado) et au nord (Bembèrèkè & Kandi) du Bénin.	26
Figure 11: Effet des précédents culturels et de la pratique paysanne sur le rendement du coton au Centre (Bantè) et au Nord (Bembèrèkè & Kandi) du Bénin.	26
Figure 12: Cadre conceptuel de l'outil de durabilité du système de culture (CROSST).	31
Figure 13: Carte du Bénin montrant les précipitations des régions cibles.	32
Figure 14: Carte du Bénin montrant le carbone organique des sols des régions cibles.	32
Figure 15 : Monoculture de coton dans l'Alibori au nord Bénin.	33
Figure 16 : Culture Intercalaire maïs-pois d'angole dans le Nord du Bénin	33
Figure 17 : Pratique conventionnelle des paysans au centre/nord du Bénin.	33
Figure 18 : Culture intercalaire maïs - pois d'Angole dans le Sud au Bénin.	34
Figure 19 : Marge brute versus bilan de l'azote des systèmes améliorés CCEV dans quatre départements du Bénin.	39


Tables

Tableau 1: Caractéristiques principales des huit zones agro-écologiques du Bénin -----	5
Tableau 2: Espèces de CCEV promues dans différentes régions du Bénin et leurs principales utilisations -----	8
Tableau 3: Caractéristiques générales des sites ProSOL au Bénin-----	11
Tableau 4: Répartition des essais par commune, culture et type de CCEV -----	17
Tableau 5: Caractéristiques des spéculations utilisées dans les communes d'étude-----	19
Tableau 6: Description des traitements de l'essai-----	20
Tableau 7: Quelques propriétés chimiques des sols au début de l'essai dans 4 ZAE du Bénin -----	21
Tableau 8: Résultats de l'analyse de variance pour les facteurs aléatoires et fixes pour le maïs et le coton -----	24
Tableau 9: Zones agro-écologiques et cultures choisies pour le CROSST au Bénin-----	29
Tableau 10: Tableaux de données des paramètres et des indicateurs de productivité-----	29
Table 11: Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans l'Alibori -----	32
Table 12: Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans le Borgou -----	33
Tableau 13: Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans les Collines -----	34
Tableau 14: Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans le Zou -----	34
Tableau 15: Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles de l'Alibori -----	35
Tableau 16: Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV de l'Alibori -----	35
Tableau 17: Evaluation des pratiques agricoles conventionnelles du Borgou-----	36
Tableau 18: Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV du Borgou -----	36
Tableau 19: Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles des Collines -----	37
Tableau 20: Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV des Collines-----	37
Tableau 21: Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles du Zou -----	38
Tableau 22: Évaluation des pratiques agricoles améliorées CCEV du Zou-----	38

Liste d'abréviations

BMZ	Ministère fédéral allemand de la coopération économique et du développement
CARDER	Centres d'Action Régionaux pour le Développement Rural
CCEV	Cultures de Couvertures et Engrais Verts
CIAT	Centre International d'Agriculture Tropicale
CRA-Centre	Centre de Recherche Agricole - Centre
CROSST	Outil de Durabilité du Système de Culture
CSA	Agriculture soutenue par la communauté
DSSAT	Système d'aide à la décision pour l'agrotechnologie
GDT	Gestion Durable des Terres
GIZ	Agence Allemande de Coopération Internationale
GPS	Système de localisation par satellite
ID	Intensification Durable
INRAB	Institut National de Recherches Agricoles du Bénin
IITA	Institut International d'Agriculture Tropicale
MOS	Mode d'Occupation du Sol
MRD	Ministère du Développement Durable
PCV	Période de Croissance Végétale
ProSOL	Projet de protection et Réhabilitation des sols pour Améliorer la Sécurité Alimentaire
QPM	Maïs à fortes teneurs en protéines
RAMR	Projet de Recherche Appliquée à la Ferme
SAIF	Cadre d'évaluation de l'intensification durable
SEWOH	Projet « Un monde – Sans Faim »
SG	Sasakawa Global
VBA	Code de programmation <i>Visual Basic</i> pour Application
WLE	Programme de recherche sur l'eau, les terres et les écosystèmes
ZAE	Zone Agro-Ecologique
ZALF	Centre de Recherche sur le Paysage Agricole de Leibniz



Researchers work with farmers to measure and weigh forage grasses in field trials to find better forage feed varieties project  Georgina Smith/ Alliance of Bioversity International and CIAT

1. Introduction

La baisse continue de la fertilité des sols constitue l'une des principales contraintes des pays de l'Afrique sub-Saharienne avec pour conséquence la baisse du niveau de productivité des cultures (Saidou et al., 2012). Une étude récente menée au Bénin dans les départements du Zou, Borgou et Alibori indique que 90% des terres ont un niveau de fertilité faible à très faible (ProSOL, 2016a). Pour faire face à cette baisse de fertilité, les engrais chimiques ont été proposés, cependant ils coûtent chers et ne sont pas souvent accessibles pour la grande masse paysanne (Sokpoh, 1997). De nombreux systèmes de culture ont été testés aussi bien en station qu'en milieu réel (Azontondé et Kpagbin, 2008) puis proposés aux agriculteurs comme alternatives aux engrais minéraux. Au nombre de ces systèmes de culture, on a l'utilisation des plantes de couvertures en association ou en rotation, comme *Cajanus cajan* et *Mucuna pruriens* var *utilis* (Azontondé & Kpagbin, 2008 ; Allagbé et al., 2015) ou encore le fumier de ferme. Malheureusement, l'intégration agriculture-élevage à travers l'utilisation des déjections animales pour amender les terres dégradées n'est pas très optimale (ProSOL, 2016b) à cause de la gestion complexe de ces ressources et du nombre limité des animaux par ménage. Il s'avère donc pertinent, surtout dans une perspective de durabilité des systèmes de production, de réfléchir à des mécanismes qui génèrent naturellement le fonctionnement des processus biologiques, à savoir la jachère améliorée avec les CCEV.

Au Bénin, plusieurs espèces de plantes de couvertures ont été introduites depuis les années 1980 (Houndékon et al., 1998), mais deux sont encore cultivées : *Mucuna pruriens* et *Cajanus cajan*. Les résultats obtenus par Versteeg et Koudokpon (1993) montrent que le rendement grain du maïs produit après l'utilisation du *Mucuna* était de 70% plus élevé que le témoin sans *Mucuna* au Bénin. Kouelo et al. (2013) ont montré que l'apport d'azote et phosphore sur une rotation *Mucuna*-maïs n'a pas amélioré de façon significative le rendement du maïs en comparaison avec la rotation sans apport. Au Togo, Sogbedji et al. (2006) ont révélé que le *Cajanus cajan* permet la restructuration du sol et l'augmentation du rendement du maïs, et que l'utilisation de *Mucuna pruriens* comme plante de couverture augmente de façon significative les taux d'azote et de phosphore dans le sol. Au Burkina Faso, Coulibaly et al. (2017) ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre la pratique vulgarisée (150kg de NPK et 50kg d'Urée) et l'apport localisé à la micro-dose (75kg de NPK et 50kg d'Urée).

Depuis 2015, le projet ProSOL pour améliorer la sécurité alimentaire intervient dans quatre départements (Zou, Collines, Borgou et Alibori) au Bénin à travers l'intégration des mesures de Gestion Durable des Terres (GDT). La GDT est une stratégie permettant de recourir à des technologies et approches de « bonnes pratiques » pour résoudre le problème de dégradation des sols. Elle contribue non seulement à améliorer la productivité des sols, mais aussi à fournir de nombreux services écosystémiques (ProSOL, 2016b).

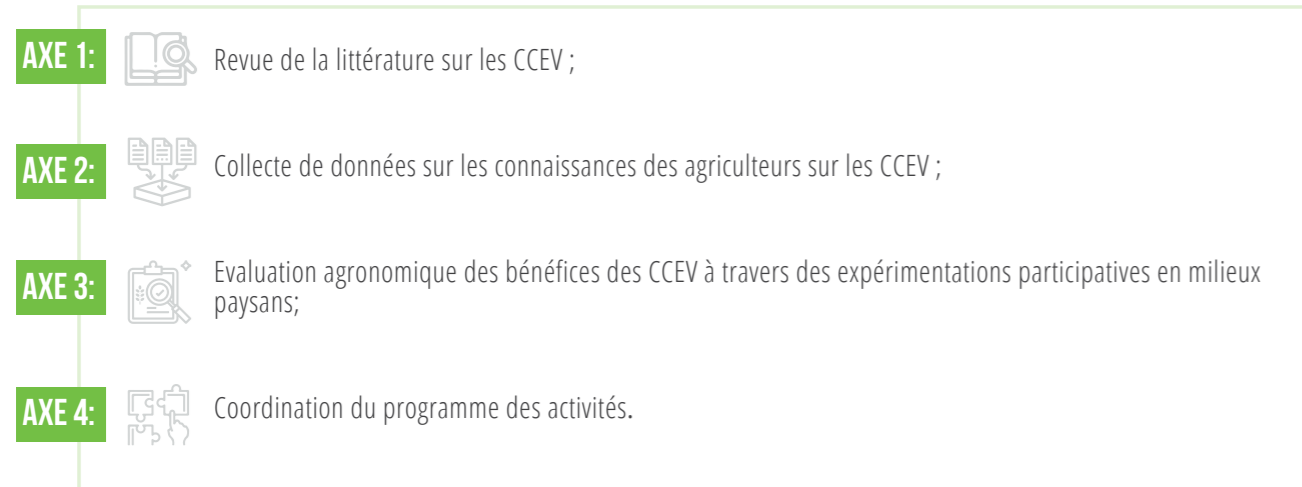
Depuis quelques années, on assiste à un afflux d'intérêt pour les CCEV. Certaines CCEV ont déjà été testées par la GIZ et ses partenaires dans les trois pays d'opérationnalisation. En général, il a été prouvé que les technologies CCEV améliorent les performances agronomiques des exploitations agricoles, ainsi que la fertilité et la santé des sols.

Cependant, malgré quelques décennies de recherches sur les CCEV, l'adoption de cette technologie par les agriculteurs au Bénin est faible. Selon Floquet et al. (2015), en évaluant le stade atteint par l'introduction du *Mucuna* dans les systèmes de culture, ils concluent que la trajectoire d'innovation purement technologique, sans les volets organisationnels et économiques qui auraient pu permettre le développement autonome d'une filière rentable de semences et d'intrants, a contribué à réduire l'intérêt d'une plante de couverture non-alimentaire et non-commercialisable dans les systèmes à base de maïs et coton.

Toutefois, étant donné que les CCEV sont intelligents du point de vue climatique et qu'ils rendent des services écosystémiques, il est possible d'étudier des moyens d'incitation pour l'adoption des CCEV par les agriculteurs, si nécessaire, à travers le biais de paiements directs ou indirects. C'est pour cela que la présente étude a été initiée afin d'évaluer les intérêts biophysiques des CCEV dans la protection et la réhabilitation des sols, et de chercher les voies et les moyens pour faciliter leur adoption par les producteurs. Le projet permettra à la GIZ d'accroître la protection et la réhabilitation des sols en apportant des preuves scientifiques des bénéfices et des contraintes des CCEV.

Présentation du projet

L'approche globale, à la base de ce projet, était double puisqu'elle s'appuyait sur les résultats scientifiques disponibles ainsi que sur les connaissances et les pratiques des agriculteurs encadrés par le ProSOL.



© Rolf Sommer/ Alliance of Bioversity International and CIAT

2. Revue littéraire

2.1 Introduction

Le but de cette revue est de rassembler les connaissances sur le rôle des CCEV dans la protection et la réhabilitation des sols, et d'identifier les obstacles à l'adoption par les petits exploitants agricoles. La revue a identifié les projets passés et en cours sur les CCEV au Bénin, leurs domaines d'activité, les types et les systèmes de culture des CCEV, leur statut d'adoption et leur utilisation en tant qu'aliment et leur rôle dans la gestion de la fertilité du sol.

Depuis 1920, les cultures de couverture étaient utilisées comme des cultures destinées spécifiquement à couvrir le sol afin de le protéger à la fois contre l'érosion et les pertes d'éléments nutritifs par infiltration et ruissellement (Parker, 1920 ; Pieters & McKee, 1938). Plus récemment, Florentín et al. (2010) ont défini les CCEV comme des plantes semées indépendamment, ou associées à d'autres cultures, destinées à couvrir le sol et à en améliorer ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

Ainsi, pour qu'une culture soit considérée comme culture de couverture, les conditions suivantes s'avèrent importantes : 1) être facile à établir; 2) avoir un taux de croissance rapide pour réaliser une couverture suffisante du sol; 3) produire une grande quantité de matière sèche; 4) résister aux maladies et ne pas agir comme hôte pour les maladies des cultures associées; 5) être facile à gérer; 6) être économiquement viable; 7) s'enraciner profondément; 8) avoir peu ou pas de concurrence pour l'humidité et les nutriments avec la culture principale et 9) avoir de multiples utilisations (Reeves, 1994; Khan et al., 2002; Gachene & Kimaru, 2003).

En Afrique subsaharienne, les sols sont caractérisés par une faible teneur en éléments nutritifs (Gachene et al., 1997 ; Saïdou et al., 2018) et par conséquent une faible productivité des cultures, l'insécurité alimentaire et la malnutrition, en particulier dans les petites exploitations agricoles (Mugwe et al., 2009 ; UN, 2007 ; Florentín et al., 2010). Bien que l'utilisation d'engrais minéraux pour augmenter la productivité des cultures soit en augmentation (Triberti et al., 2016 ; Diogo et al., 2017), la majorité des petits exploitants ont un accès limité à des fonds pour l'achat d'engrais et pratiquent une production à faible intrant (Ndakidemi, 2006 ; Klutse et al., 2018). Cette production continue associée à l'utilisation inadéquate d'engrais minéraux (Diogo et al., 2018a) a entraîné une augmentation des taux d'extraction des éléments nutritifs du sol et a contribué à l'infertilité des sols (Henaio & Baanante, 2006).

Les CCEV sont un bon complément à d'autres pratiques d'amélioration de la santé du sol en raison de leur prix abordable et de leurs effets améliorateurs sur la santé du sol (Chianu et al., 2008). Ainsi, les principaux genres recensés dans de nombreux pays incluent : *Mucuna*, *Aeschynomene*, *Stylosanthes*, *Lablab*, *Canavalia*, *Crotalaria*, *Desmodium*, *Cajanus* et *Stylosanthes* sont. D'autres cultures régulières, même si elles ont été utilisées pendant longtemps comme cultures vivrières, présentent les caractéristiques des cultures de couverture mentionnées ci-dessus. Dans cette revue, si la principale raison de production de ces cultures est l'avantage du sol, comme par exemple par l'amélioration de la fertilité grâce à la couverture maximale ou l'augmentation de la matière organique par la rétention de résidus, alors ces cultures sont considérées comme des CCEV. De telles cultures incluent par exemples : les arachides, le soja et le niébé.

Les cultures de couverture améliorent la teneur en matière organique du sol associée à une capacité accrue de rétention d'eau dans les sols à texture sableuse (Becker et al., 1995). En outre, les CCEV fournissent également une couverture de sol qui le protège contre l'érosion hydrique et éolienne (Parker, 1920 ; Pieters & McKee,

1938 ; Hoorman, 2009) et les mauvaises herbes (Carsky et al., 2001). Ils créent également des conditions favorables pour la diversité et les fonctions de la biodiversité souterraine impliquées dans les transformations et le cycle des éléments nutritifs du sol (Midega et al., 2013 ; Vukicevich et al., 2016) et l'agrégation des sols (Hoorman, 2009 ; Soti et al., 2016). Certaines CCEV, telles que *Mucuna* et *Canavalia*, réduisent la prévalence des nématodes qui attaquent les céréales (Arim et al., 2006). En outre, *Canavalia ensiformis* est un remède biologique du sol pour les herbicides Sulfentrazone (Madalão et al., 2017).

Les CCEV jouent un rôle important dans la fixation de l'azote, pouvant atteindre jusqu'à 320 kg N ha⁻¹ en fonction du type de CCEV, de la quantité de précipitation et de l'état de la fertilité du sol (Ojiem et al., 2007). Par exemple, dans l'Ouest du Kenya, la fixation de l'azote atmosphérique (N₂) dans les champs très fertiles à moyennement fertiles a diminué de 12% et de 22% dans les champs moyennement fertiles à peu fertiles (Ojiem et al., 2007). Le *Mucuna*, le *Lablab* et l'arachide ont un potentiel de fixation de N₂ élevé dans les ZAE et les gradients de fertilité du sol (Ojiem et al., 2007). Parmi les autres avantages tirés des CCEV, il y a la régulation du changement climatique par la séquestration du carbone (Olson et al., 2014 ; Lal, 2015), l'amélioration des rendements céréaliers (Gachene et al., 2000 ; Maobe et al., 2000 ; Salako et Tian, 2003 ; Fofana, 2005 ; Kaizzi et al., 2006) et du fourrage pour les animaux (Weber, 1996). Cependant, des résultats contradictoires sur les avantages de rendement ont également été rapportés dans d'autres études (Mathuva et al., 1998 ; Giller, 2001 ; Kaizzi et al., 2006).

2.2 Localisation et zonage agro-écologique au Bénin

Le Bénin est situé entre les longitudes 1° E et 3°40' E et 6°30' N et 12°30' N en Afrique de l'Ouest. Il couvre une superficie de 112 625 km², dont environ un tiers est constitué de terres agricoles. Le pays a deux types de climat, chaud et humide/subhumide au sud et semi-aride au nord, avec une région de transition au centre. Le sud a deux saisons des pluies (de mars à juillet et de septembre à novembre) tandis que le nord n'en a qu'une (de mai à octobre ; Sinsin et al., 2004). Le pays compte 77 districts administratifs répartis en huit ZAE (DPP-MAEP, 2001), allant de terres humides à semi-arides (Figure 1 et Tableau 1). Le projet ProSOL est implanté dans 18 districts et 4 départements situés dans 4 ZAE.

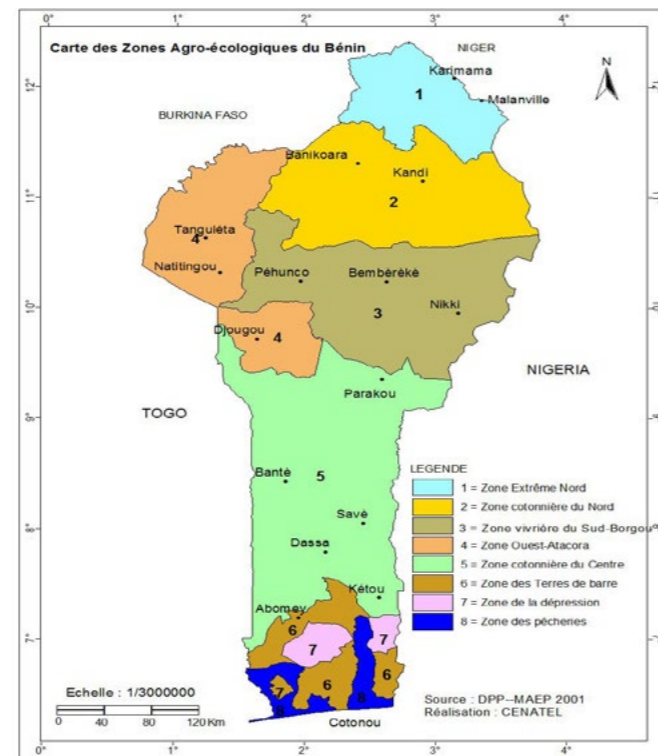


Figure 1: Carte des zones agro-écologiques du Bénin

Le Bénin est fortement dépendant de l'agriculture, source de subsistance pour environ 80% de sa population et contribuant pour environ 38% de son produit intérieur brut (Gollin & Rogerson, 2014). Les cultures vivrières de base comprennent : l'igname, le manioc, le haricot, le riz et le maïs. Les principales cultures de rentes sont le coton, les noix de cajou, les noix de karité, les ananas, les palmiers, le cacao et le café (Minot & Daniels, 2005). Sur la production totale dans les 18 districts, deux cultures couvrent la plus grande superficie, à savoir le maïs avec environ 36% et le coton entre 65 et 87% ; le coton étant la principale culture d'exportation du Bénin (MAEP, 2015).

Tableau 1: Caractéristiques principales des huit zones agro-écologiques du Bénin

Zone	Départements	Zone administrative	Climat	Caractéristiques majeures des sols	Végétation	Autres	Système de cultures
1	Borgou (Extrême Nord)	Karimama, Malanville, Kandi Nord	Climat soudano-sahélien avec des précipitations uni-modales comprises entre 700 et 900 mm par an	-Sols alluviaux fertiles	Acacia épineux (Acacia sieberiana)	-Zone exposée à une forte érosion -PCV < 140 jours	-Culture de base : mil, sorgho et niébé -Cultures secondaires : coton, maïs et oignons le long des fleuves Niger et Alibori
2	-Atacora -Borgou (Nord)	Nord-Kérou, Est / Kouandé, Banikoara, Sud Kandi, Ségbana, Gogounou	Soudano-sahélien avec des précipitations unimodales comprises entre 800 et 1 200 mm par an	-sols très profonds	-Arbres délicats avec Acacia et karité -Hautement dégradée par les humains	PCV < 180 jours	-Blé et mil -Coton au début de la rotation des cultures -Creusement souvent pratiqué
3	-Atacora -Borgou (sud)	Péhunco, Djougou Est, Takourou Nord, Parakou, N'Dali, Pèrèrè, Nikki, Sinendé, Kalalé, Bembèrèké	Soudano-sahélien avec des précipitations unimodales comprises entre 900 et 1 300 mm par an	-Fertilité moyenne -Facilement lessivé	Savane boisée dominée par par <i>Butyrospermum</i> (Karité)	PCV = 140 à < 189 jours	- Cultures de base : production de sorgho et d'igname, coton et maïs en expansion *Igname plantée en début de rotation
4	Atacora	Ouakè, Ouest-Djougou, Copargo, Tanguiéta, Matéri, Koblé, Boukoubé, Natitingou, Toucountouna, Kouandé	-Varie du climat soudano-sahélien à soudano-guinéen -Les précipitations annuelles varient entre 800 et 1 300 mm	Capacité de rétention d'eau réduite -Sols fertiles (sauf sur sols peu profonds)	-Bois de savane/ arbuste avec <i>Butyrospermum</i> (Karité) et <i>Parkia</i> (fromager) -Acacia épineux (Boukoubé et Tanguiéta)	PCV = 180 to < 220 jours	Niébé Zone de production -Fonio (<i>Digitaria exilis</i>) cultivé surtout à Boukoubé -Igname, sorgho, arachides, manioc cultivés sur des crêtes nouées à flanc de colline -Cultures sur des diguettes en terrasses basses
5	-Atacora -Borgou -Mono -Ouémé -Zou	-Bassila -Tchaourou-Sud -Aplahoué -Kétou -Bantè, Glazoué, Ouessè, Savalou, Dassa, Savè, Djidja	- Sudano-guinéen avec des précipitations bimodales au sud et unimodales au nord - Les précipitations varient entre 1 000 et 1 200 mm par an (Igue et al., 2000)	- Très variable	Savane boisée / arbuste dominée par <i>Danifiaohiori</i>	-PCV < 240 jours	Maïs, niébé et arachides cultivés en première saison Coton établi au début de la rotation

Zone	Départements	Zone administrative	Climat	Caractéristiques majeures des sols	Végétation	Autres	Système de cultures
6	-Atlantique -Mono -Ouémé -Zou	-Allada, Zè, Tori-Bossito, Kpomassè, Djakotomè, Toviklin, Klouékanmè, Bopa, Dogbo-Tota, Houeyogbé -Sakété, Ifangni, Avrankou, Adjarra, Akpro-Misséré, Porto-Novo -Agbangnizoun, Abomey, Bohicon, Za-Kpota, Covè, Zagnanado, Zogbodomey	- Soudano-guinéen climat avec des précipitations bimodales d'environ 800 à 1 200 mm à l'ouest et de 1 000 à 1 400 mm par an à l'est (Igue et al., 2000)	-Profond et facile à travailler -La plus grande partie du sol est actuellement dégradée	-Arbuste dense (dominants palmiers et herbes)	-PCV = 240 jours	- Les cultures principales sont le maïs (au début de la rotation), l'arachide et le manioc - Palmier à huile principalement cultivé -Coton cultivé dans certaines zones sèches
7	-Atlantic -Mono -Ouémé	-Toffo -Lalo -Adja-Ouèrè, Pobè	-Climat soudano-guinéen avec des précipitations bimodales d'environ 800 à 1 200 mm à l'ouest et de 1 000 à 1 400 mm par an à l'est (Igue et al., 2000)	-Sols très profonds -Fertile, mais souvent gorgé d'eau	Forêt dense semi-décidue avec de grands arbres	Assez haute zone de dépression -PCV = 210-240 jours	- Maïs établi en début de rotation - Le niébé, le manioc et les légumes sont également cultivés
8	-Atlantic -Mono -Ouémé	-Ouidah, Abomey-calavi, Cotonou, Sô-Ava, -Lokossa, Athiémé, Comé, Grand-Popo, -Sèmè-Kpodji, Aguégué, Dangbo, Adjohoun	- Soudano-guinéen Climat avec des précipitations bimodales comprises entre 1 000 et 1 400 mm par an. (Igue et al., 2000)	- Sols alluviaux fertiles -Sols sableux infertiles le long de la côte	- Savane herbeuse des prairies -Formations marécageuses - Des mangroves	-Agriculture complétée par la pêche - Zones lacustres fluviales - PCV = 240 jours	- La séquence de rotation principale est le maïs (culture principale) avec niébé ou légumes - Maïs et manioc dominant dans les zones non sableuses

PCV = Période de croissance végétative. Source: INRAB (2016)-

2.3 Promotion des espèces CCEV au Bénin

Les espèces CCEV communes adoptées et promues au Bénin comprennent : *Mucuna*, *Aeschynomene*, *arachides*, *soja*, *niébé*, pois d'Angole et *Stylosanthes*. Les CCEV qui existent déjà au Bénin et qui sont vulgarisés, peuvent être subdivisés en deux catégories : les légumineuses herbacées utilisées pour l'alimentation (arachides, soja, niébé, pois d'Angole) et les légumineuses herbacées utilisées pour la restauration des sols (*Mucuna*, *Aeschynomene* et *Stylosanthes*). De brèves informations sur les CCEV sont illustrées ci-dessous et dans le Tableau 2.

Le haricot velours (*Mucuna pruriens*) est une culture de couverture légumineuse populaire introduite en 1987 parmi une quinzaine d'agriculteurs grâce à une recherche participative menée dans le département du Mono au Bénin (Vissoh, 2006) dans le but d'accroître la fertilité des sols. La culture se porte bien dans les zones où les altitudes sont <1 600m

et >1 000mm de précipitations. Deux systèmes de gestion ont été mis au point dans la zone subhumide du sud du Bénin, dans le but d'intégrer le *Mucuna* aux systèmes de culture afin d'améliorer la fertilité des sols et de lutter contre les mauvaises herbes. Ces systèmes comprennent :

Établissement de *Mucuna* comme seule culture de couverture en courte jachère pour les champs sérieusement dégradés et, *Mucuna* planté comme relais dans les champs de maïs nécessitant moins de réhabilitation. Dans la zone bimodale du sud du Bénin, le *Mucuna* est planté en mars et en avril afin de maximiser l'accumulation de biomasse et la couverture végétale. Cependant, la date de semis peut être prolongée jusqu'en mai si les pluies sont en retard. En moyenne, le *Mucuna* produit entre 2-10 t ha⁻¹ de matière sèche et entre 200-2 000 kg ha⁻¹ de grains (Cook et al., 2005). Il était particulièrement

populaire au sein des agriculteurs en 1990 en raison de sa capacité à supprimer les mauvaises herbes comme *Imperata cylindrica* et *Striga hermontica* (Galiba et al., 1998). Les agriculteurs des départements de l'Atacora, de l'Atlantique, du Borgou, du Mono, de l'Ouémé et du Zou travaillant avec Sasakawa Global 2000 (SG, 2000) ont signalé une élimination complète d'*Imperata* après 2 ou 3 cultures consécutives de *Mucuna* (Galiba et al., 1998). De plus, lorsqu'il a été utilisé dans des jachères améliorées, le *Mucuna* a considérablement amélioré les rendements des cultures ultérieures. Par exemple, après un an de jachère du *Mucuna*, une augmentation du rendement du maïs a été observée pour les variétés de maïs locales (500 kg ha⁻¹) et améliorées (800 kg ha⁻¹; Versteeg et Koudokpon, 1993). L'augmentation du rendement correspond aux estimations de l'apport d'azote supérieur à 100 kg N ha⁻¹ de *Mucuna* par fixation biologique de l'azote (Fofana, 2005).

Jointvetch Porcupine (*Aeschynomene histrix*), une plante dicotylédone de la famille des fabacées, est une légumineuse herbacée adaptée à un large éventail de sols et de climats, et qui prospère également dans des conditions de sol défavorables (sablonneuses, stériles, acides et mal drainées). Introduit depuis la Côte d'Ivoire en 1989, *Aeschynomene histrix* (*A. histrix*) a été évalué dans les savanes du nord du Bénin en 1998 (Ehouinsou & Aboh, 1998). Cette évaluation portait sur les techniques culturales, la tolérance aux maladies et à la sécheresse, les méthodes de gestion, la production de biomasse, la production de semences et la teneur en protéines brutes. Le résultat de l'étude indique que *A. histrix* est adapté à l'écologie des savanes du nord du Bénin. Il a été introduit au Bénin pour l'alimentation des animaux et la régénération des sols. La culture améliore non seulement la fertilité du sol, mais agit également comme une couverture du sol et produit une grande quantité de fourrage de qualité, en particulier pendant la saison sèche. *A. histrix* peut produire 2 à 6 tonnes de matière sèche et environ 260 kg ha⁻¹y⁻¹ de grains.

Soja (*Glycine max*) est une légumineuse à grains avec une productivité élevée de biomasse contenant environ 3,5% N et 0,15% P (Gachene et Kimaru, 2003). Le soja fixe jusqu'à 300 kg N ha⁻¹ (Hungria et al., 2006) et contribue à hauteur de 112 kg N ha⁻¹ à la culture suivante (Gentry et al., 2001). Il restaure et maintient la fertilité des sols de manière durable, ce qui conduit à améliorer les rendements (Smaling et al., 2008).

Niébé (*Vigna unguiculata*) se développe et mûrit dans une période de 60 à 80 jours (Kamara et al., 2018). Le niébé est une légumineuse à grains dont la biomasse est utilisée comme culture fourragère. Il tolère le stress et est adapté aux conditions climatiques variées. La valeur estimée du remplacement du niébé par des engrais azotés peut aller de 5 kg ha⁻¹ (Carsky et al., 2001) à 80 kg N ha⁻¹ (Horst & Hardter, 1997), en particulier après l'incorporation de résidus de niébé ou la culture de deux légumineuses au cours d'une même saison de campagne (Horst & Hardter, 1994). La culture intercalaire du niébé avec des cultures céréalières réduit souvent les rendements en légumineuses en raison de l'ombrage des cultures céréalières (Olufajo et Sigh, 2002). Cependant, une bonne performance est obtenue lorsque des variétés de niébé à couverture étalée sont cultivées par rapport aux variétés érigées (Ewansiha et al., 2014).

Arachide (*Arachis hypogaea*) est une légumineuse fixant l'azote, tolérante à la sécheresse et cultivée comme culture de rente au Bénin (MDR, 2000). Le stade de maturité des arachides varie entre 90 et 120 jours selon la variété plantée (Yao, 2015). La culture a une caractéristique d'autopollinisation, ce qui permet aux graines de rester viables pendant longtemps. Dans la zone IV du Bénin, les agriculteurs cultivent des arachides avec du sorgho, tandis que dans la zone III, la monoculture d'arachides est pratiquée en raison de l'inadéquation d'autres cultures due à l'invasion au *Striga*. Les producteurs d'arachide n'utilisent généralement pas d'engrais inorganiques ; cependant, la pourriture des gousses est évidente dans les sols pauvres en calcium, ce qui réduit le remplissage et les rendements des gousses (MDR, 2000).

Stylo (*Stylosanthes hamata*) est une légumineuse vivace principalement cultivée pour le fourrage du bétail. Il est bien adopté dans les régions de moins de 1 500m d'altitude et des précipitations entre 500 et 2 000 mm (Cook et al., 2005). La culture est tolérante à la sécheresse et peut bien fonctionner dans des sols peu fertiles (Jones et al., 2003). En moyenne, *S. hamata* produit environ 1-6 t ha⁻¹ de matière sèche et 50-500 kg ha⁻¹ de grains. Des études ont montré que la jachère de *S. hamata* améliorerait de 50 - 100% les rendements en grains des cultures céréalières subséquentes et fixait plus de 100 kg N ha⁻¹ par an (Sanginga et al., 1996). L'historique des différents CCEV introduits au Bénin est résumé dans le tableau 2.

Tableau 2: Espèces de CCEV promues dans différentes régions du Bénin et leurs principales utilisations

Organisation/ Programme	Année de promotion	Espèces de CCEV	Les usages	Région
MRD_RAMR; IITA; RTIN	1987	Mucuna pruriens	Désherbage, engrais vert, fourrage	Sud Bénin: Zouzouvou
RACRDs; SG 2000	1990-1995	Mucuna pruriens	Engrais vert, fourrage	Atacora, Atlantique, Borgou, Mono, Ouémé et Zou
INRAB; RD Savè; PADSE ; AFD	1998-2004	Mucuna pruriens, Aeschynomene histrix,	Contrôle des mauvaises herbes, fourrage, nourriture	Collines et Alibori
FAO; INRAB; CRA-Center	2005	Gliricidia sepium, Aeschynomene histrix, Mucuna pruriens, stylosanthes hamata, Arachis hypogea, Vigna unguiculata, and Glycine max	Engrais vert, nourriture	Région des Collines: Minefi, Gomez Apéro et Ouessè

2.4 Fertilité des sols au Bénin

Les sols du Bénin peuvent être divisés en deux grandes catégories : 1) les sols développés sous un climat de deux saisons sèches et un climat de deux saisons pluvieuses et sous une végétation arbustive dense du sud, et 2) les sols qui se sont développés sous un climat d'une saison sèche et une saison pluvieuse et sous une végétation de savane (Adégbola et al., 2016). Ceux de la première catégorie ont de bonnes propriétés physiques, à savoir : haute perméabilité, grande profondeur, grande résistance à l'érosion et de bon à moyen indice d'instabilité structurelle. Cependant, leur réserve en eau est faible. Les propriétés physiques des sols de la deuxième catégorie sont moins bonnes : perméabilité moyenne, profondeur relativement faible, résistance moyenne à l'érosion, indice d'instabilité structurelle moyenne à élevé et faible réserve en eau. Ces deux catégories de sols ont une caractéristique commune, à savoir leur faible réserve en eau. Cette grave carence générale des sols au Bénin est l'une des principales causes de la faiblesse des rendements agricoles dès que la régularité des précipitations n'est plus assurée. Le sol s'assèche rapidement et les plantes flétrissent. Outre cette insuffisance générale des sols au Bénin, il faut ajouter que ceux de la zone soudano-guinéenne, des savanes, ont plus de contraintes physiques au développement (Igue et al., 2013). Leur dégradation s'accélère dès leur culture, il faut donc les exploiter avec plus de délicatesse en mettant en œuvre des mesures de conservation adaptées (Azontondé, 1991). Les principales causes de dégradation des sols au Bénin sont notamment les suivantes : mauvaises pratiques agricoles, défrichement des terres marginales pour la culture, transformation du charbon de bois, surpâturage et destruction de la biomasse par des feux de brousse ou des incendies récurrents (Baba et al., 2016). L'érosion des sols est une menace majeure pour la production agricole et a entraîné une réduction d'environ 72% du rendement des cultures (Ziervogel et al., 2006).

Comme dans le cas de la dégradation des terres, les problèmes de régime foncier et de sécurité ne sont pas suffisamment pris en compte par les services de recherche et de vulgarisation (Igue et al., 2000). L'incertitude entourant la sécurité foncière réduit la confiance des agriculteurs dans les avantages à long terme des investissements réalisés dans l'amélioration des terres. Au contraire, l'augmentation de la sécurité d'occupation des terres entraînerait pour les agriculteurs un accès à des crédits favorisant non seulement des investissements plus importants dans les intrants à court terme, mais également de plus grands investissements dans les technologies de conservation et de gestion des terres (Saïdou et al., 2007).

L'utilisation des périodes de jachère dans la gestion des cultures améliore l'accumulation de matière organique, ce qui contribue à restaurer progressivement la fertilité du sol. Cependant, la population croissante et la pauvreté grandissante obligent les producteurs à réduire les périodes de jachère sans reconstituer les sols par l'application d'autres stratégies d'amélioration des sols (Brabant et al., 1996). En outre, les changements d'utilisation des sols qui ne sont pas souvent accompagnés de mesures de protection et de réhabilitation ont également accéléré la dégradation des sols.

L'utilisation des légumineuses en tant que CCEV présente les avantages suivants : (1) elles enrichissent le sol en azote (N₂) biologique fixé, (2) conservent et recyclent les éléments nutritifs du sol, (3) assurent la protection du sol afin de réduire l'érosion et (4) nécessitent peu ou pas d'engrais minéraux immédiats. Cependant, à intervalle planifié, le travail du sol est nécessaire pour soutenir l'établissement, la maintenance et l'incorporation de ces engrais verts (Franzluebbbers et al., 1998 ; Groot et al., 1998).

Les sols dans le sud et le centre du Bénin ont une très faible capacité d'échange cationique (Igue et al.,

2013). Selon la même étude, 68% des sols du sud et du centre du Bénin ont perdu leur potentiel agricole et appartiennent aux classes III et IV. Ce phénomène est dû à leurs faibles teneurs en azote, en phosphore, en potassium et à leur capacité d'échange cationique très faible. L'azote et le phosphore sont les macronutriments végétaux les plus importants dont les carences dans le sol limitent la production agricole et menacent les moyens de subsistance en milieu rural au Bénin (Saïdou et al., 2003). Malgré la carence en nutriments signalée dans la majorité des terres arables, l'utilisation d'engrais inorganiques est principalement limitée à la production de coton. En effet, le coton est la principale culture de rente du Bénin qui a été stimulée par l'intervention de l'État dans la plupart des régions du pays (Saïdou et al., 2012; Honfoga, 2018). Au Bénin, le maïs est à la fois une culture de rente et de subsistance. Cependant, les engrais appliqués au maïs sont marginaux et proviennent d'effets résiduels dans les rotations coton-céréales (Saïdou et al., 2012). Cela pourrait être attribué au fait que les prix du marché des cultures vivrières sont inférieurs aux dépenses engagées pour l'achat d'engrais (Ivo, 2008). La réaction des cultures à l'application d'engrais est également imprévisible, ce qui réduit leur utilisation par les agriculteurs pauvres en ressources (Honfoga, 2018). En outre, l'approche de la révolution verte axée sur le marché a mis l'accent sur l'utilisation d'engrais inorganiques. Pourtant, les crédits aux agriculteurs ne permettent pas l'utilisation de la gestion de la fertilité des sols spécifique au site et l'adoption de mécanismes développés pour la réponse au risque (Bellwood-Howard, 2014). Ainsi, une intensification agricole durable n'a pas été atteinte.

2.5 Systèmes d'exploitation au Bénin

Au Bénin, la production de culture est principalement une activité de subsistance pratiquée dans les systèmes agricoles traditionnels (par exemple, la culture itinérante), où les intrants faibles tels que l'utilisation d'outils traditionnels, les engrais et l'irrigation sont prédominants (Mulindabigwi, 2006). La culture arable est pratiquée dans les régions du sud, du centre et du nord (Manyong et al., 1996) avec une dotation en ressources différentes.

Alors que les zones guinéennes basent leur agriculture autour du maïs sur des sols ferrallitiques et ferrugineux, dans les zones soudaniennes elle est basée sur le sorgho associé à l'arachide ou le niébé. Il est fortement recommandé d'introduire des variétés à cycle court et moyen pour la zone soudanienne et celles à cycle moyen pour la première zone.

Sud Bénin : cette zone couvre 10% du pays où résident 60% de la population. Le potentiel de la zone est élevé malgré la baisse des rendements au cours des dernières années (Baba et al., 2016). La principale utilisation des terres dans la région est la production de maïs, de manioc, de haricots, de sorgho et de légumes. Les cultures de rente comprennent l'arachide, le palmier à huile et la noix

de cajou. Les cultures vivrières sont principalement intercalées tandis que le palmier à huile et le coton sont généralement en monocultures. Les champs éloignés sont utilisés pour la culture du coton et du maïs dans un système de jachère arbustive (Manyong et al., 2000). L'élevage de bétail dans la région implique la pratique du pâturage libre dans les champs après la récolte de la culture principale.

Sur les sols ferrallitiques, deux systèmes de gestion différents ont été développés pour l'intégration du *Mucuna* dans les systèmes de culture (Manyong et al., 2000). L'une est une culture de couverture en jachère unique pour les champs gravement dégradés. La seconde est une culture de relais maïs/*Mucuna* pour les champs nécessitant moins de réhabilitation. Pour les champs gravement dégradés et infestés par *Imperata cylindrica*, *Mucuna* doit être planté en peuplement pur au début de la saison des pluies. Trois ou quatre semaines après la plantation du *Mucuna*, une seconde coupe peut être nécessaire pour permettre aux plants de *Mucuna* de vaincre *Imperata cylindrica* car il s'agit d'une mauvaise herbe à croissance rapide. Une production de matière sèche de 7 à 9 t / ha est généralement observée dans la zone de pluie bimodale (Vissoh et al., 1998). À la saison sèche, *Mucuna* achève son cycle de vie en laissant un paillis épais exempt de mauvaises herbes. Cela permet une récolte ultérieure du maïs pendant la longue saison des pluies avec peu ou pas de préparation ou de désherbage.

Centre Bénin : zone caractérisée par une pression foncière due à une immigration continue en provenance du sud, entraînant la déforestation des forêts primaires et la conversion en terres agricoles pour la culture du coton, de l'arachide et du maïs. Par exemple, le système de culture basé sur l'igname dans les collines (Savè) a entraîné la déforestation de la forêt de Boukou. La culture du coton est également en expansion ; le niébé étant sa culture complémentaire. De grandes quantités d'engrais et d'autres intrants sont utilisées (Minot et Daniels, 2005). L'élevage de bétail dans la région par les pasteurs, en particulier le pâturage libre après la récolte de la culture principale, compromet l'adoption des CCEV, comme le *Mucuna* en jachère, entraînant des conflits entre agriculteurs et éleveurs.

Nord Bénin : la région se caractérise également par une densité de population inférieure à celle des autres zones (Callo – Concha et al., 2012). Les systèmes de production sont basés soit sur le coton, soit sur la production animale. La production de coton a reçu beaucoup de soutien du gouvernement. Cependant, la production animale est bien établie et intégrée aux activités agricoles arables. La demande accrue de champs arables a entraîné l'ouverture de plus de terres dans les zones conservées. Cela a réduit le nombre de zones de pâturage conduisant au surpâturage, ce qui a poussé les éleveurs à envahir les terres cultivées, provoquant ainsi des conflits persistants dans l'utilisation des terres (Callo Concha et al., 2012). D'autre part, la demande non-satisfaite de terres arables a raccourci les périodes de jachère, ce qui a entraîné une culture continue

menant à l'aggravement de la dégradation des terres (Igue et al., 2000). Environ 75% des agriculteurs du nord du Bénin utilisent des engrais inorganiques pour certaines cultures, la rentabilité étant obtenue principalement dans les systèmes irrigués (Laube, 2007).

Les CCEV sont cultivés en culture pure et en combinaison avec des plantes annuelles et vivaces. Dans toutes les zones agro-écologiques, on note l'association et la rotation du maïs-*Mucuna* avec la culture du maïs et la plantation du *Mucuna* tous les deux ans. Dans ces conditions, il n'y a pas de fertilisation minérale. Les autres systèmes de culture sont identiques au premier, mais le *Mucuna* est planté chaque année. Le maïs est semé après des précipitations supérieures à 15 millimètres, généralement entre le 15 avril et le 15 mai, à une densité de 62 500 pieds à l'hectare à raison de 2 grains par poquet. La récolte se fait entre le 30 juillet et le 30 août.

Les agriculteurs béninois ont recours à plusieurs pratiques pour gérer la fertilité de leurs terres. Des études antérieures dans le nord du Bénin mentionnent ce comportement (de Haan, 1997 ; Wennink et al., 1999), qui se retrouve également dans toute la région soudano-sahélienne (Pieri, 1989 ; McIntire et al., 1992 ; Jabbar, 1994). Les pratiques les plus couramment utilisées dans les différentes combinaisons sont la rotation des cultures, le stockage en rotation directe, le paillage, les intrants

d'engrais minéraux ou organiques sous forme de fumier ou de compost, l'utilisation de plantes de couverture.

L'évolution des pratiques et stratégies de gestion de la fertilité des sols met en évidence leur importance pour la question de la gestion durable des sols. La diversité des pratiques reflète également l'adaptation des agriculteurs aux nouvelles situations, ainsi que l'insuffisance des solutions apportées par la recherche et la vulgarisation. Les terres en jachère, l'incorporation de la biomasse de légumineuses, la couverture du sol, la fertilisation organique et minérale et la rotation des cultures sont les types de pratiques qui ont lieu dans toutes les régions. Toutefois, l'intensité d'utilisation des pratiques varie en fonction de la pression foncière, de l'importance de la culture du coton, des spécificités de chaque zone agro-écologique. Les pratiques sont plus diversifiées lorsque la pression foncière est plus forte et que la jachère disparaît. La diversification des pratiques se fait également en fonction du niveau d'intégration de l'agriculture et de l'élevage à la ferme (Floquet et al., 2006).

Dans les zones où la pression foncière est relativement faible, les résidus de récolte ne sont pas utilisés pour la gestion de la fertilité du sol. Par contre, dans les zones où la pression foncière est élevée, les champs de paillage avec des résidus de récolte, suivis ou non d'un pâturage en rotation directe, contribuent au maintien de la fertilité du sol.

Les zones ont été choisies en raison de la faible fertilité du sol et des critères suivants :

- Niveau de dégradation du sol avec des aspects faibles, modérés et élevés ;
- Niveau de fertilité du sol avec des aspects faibles, modérés et forts ;
- Proportion d'agriculteurs pratiquant des systèmes d'exploitation basés sur le riz, le soja, le maïs, le coton, la volaille ou les petits ruminants.

pour réduire la concurrence. Au cours de la saison suivante, il est coupé et le maïs est semé directement.

- *Mucuna* sous les arbres : Le *Mucuna* est une plante grimpante qui s'établit sous les arbres et les arbustes et qui reste jusqu'au développement des graines. Bien que l'objectif principal soit la production de semences, le *Mucuna* fournit toujours une couverture du sol acceptable et d'autres avantages en termes de protection du sol.

Les indicateurs de succès du projet ProSOL/GIZ sont:

Avec les systèmes de culture promus par le ProSOL, 20 000 hectares de petites terres agricoles, dont les sols qui étaient fortement dégradés ou présentant un potentiel de dégradation, sont actuellement réhabilités ou protégés.

Aussi, les rendements des principales cultures (maïs, soja, riz et coton) ont augmenté dans les champs protégés ou réhabilités par rapport aux champs non protégés. Ces résultats sont non seulement le fruit de différentes innovations introduites, mais sont également dues aux caractéristiques physiques et agro-météorologiques des différentes ZAE utilisées (Tableau 3).

De plus, l'élaboration de textes juridiques encourageant la mise en œuvre de mesures de protection des sols et d'assainissement ayant un impact positif sur le changement climatique et l'adaptation a été approuvée en février 2019 (ProSOL-GIZ, 2015).

Les principales interventions sur les CCEV préconisées par le ProSOL/GIZ sont: gestion des résidus (paillage au lieu de brûler), pois d'Angole (seules et cultures associées), *Mucuna* (seules et cultures associées) et cultures associées de soja, niébé et arachides avec du maïs. Le ProSOL, par le biais de divers acteurs, a encouragé un certain nombre de pratiques de GDT et de CCEV, qui constituaient une préoccupation majeure de la recherche agricole. En collaboration avec l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), ils ont mis au point un essai sur différentes variétés de pois d'Angole, *Mucuna*, *Aeschynomene* et *Stylosanthes* au Centre de Recherche Agricole - Centre (CRA-Centre). En 2017, le ProSOL a réussi à établir 574 et 2 732 ha de *Mucuna* (en culture pure) et de pois d'Angole (en association) et à réhabiliter 22 000 ha de terres. Les systèmes de culture *Mucuna* promus par le ProSOL au Bénin comprennent:

Culture intercalaire maïs-*Mucuna*: Le *Mucuna* est planté 21-30 jours après l'établissement du maïs

2.6 GIZ et autres projets / programmes promouvant les CCEV au Bénin

Dans le cadre d'une coopération bilatérale entre la République fédérale d'Allemagne et la République du Bénin, une initiative baptisée *One World - no Hunger* (Un Monde - sans Faim, SEWOH) a été lancée. Dans cette initiative, il y avait cinq projets : ProSOL, ProCIVA, ProSAR, ProFinA et ProPFR, et leur objectif général était une agriculture résiliente dans les petites exploitations agricoles du Bénin.

ProSOL (par le biais de la GIZ) est l'un des différents projets SEWOH qui promeut la protection et la restauration des sols pour renforcer la sécurité alimentaire au Bénin. Ses objectifs principaux incluent : la mise en œuvre de la réhabilitation des sols, l'intégration de la GDT aux niveaux politique et institutionnel et l'amélioration de la gestion et de la diffusion des connaissances en GDT (Mulindabigwi, 2015). En ciblant les petits exploitants agricoles, ProSOL travaille dans 4 départements, dont 18 communes et 385 villages (Figure 2).



Figure 2: Zones d'intervention du programme ProSOL au Bénin.

Source: ProSOL - GIZ (2015).

Tableau 3: Caractéristiques générales des sites ProSOL au Bénin

Département	Communes	Climata	Solsb	Végétation	Système de cultures
Alibori	Gogounou, Kandi, Ségbana	Tropical sec avec une seule saison des pluies de 800 à 1 200 mm par an	- Sols ferrugineux tropicaux à base cristalline, - Forte proportion de sols lessivés et de concrétions basses	- Arbuste ombragé avec <i>Acacia sieberiana</i> (épineux) et <i>Butyrospermum parkii</i> (Beurre de karité) - Fortement dégradé par des activités anthropiques	- À base de maïs / mil maïs avec mil réduit - Coton plus développé et souvent utilisé dans le système de rotation - L'igname souvent cultivé par buttage
Borgou	Bembèrèkè, Kalalé, Sinendé	Tropical sec avec une seule saison des pluies de 900 à 1 300 mm par an	- Sols ferrugineux tropicaux avec des caractéristiques variables élevées - Fertilité moyenne - Sensible à la lixiviation	Savane arbustive dominée par <i>B. parkii</i> .	- À base de /sorgho / igname avec une forte extension de coton / maïs - igname utilisée en rotation et - cultivée après sarclage sur des buttes

Département	Communes	Climata	Solsb	Végétation	Système de cultures
Collines, Zou	Bantè, Savalou; Djidja	Tropical subhumide avec deux saisons des pluies au sud et une saison des pluies au nord de 1 000 à 1 200 mm par an	-Sols ferrugineux tropicaux à base cristalline Bloc cristallin présentant des caractéristiques variables élevées.	Savane d'arbres / arbustes dominée par Danifiaohiori	Pas de système de culture dominant Utilisation du maïs, du niébé et de l'arachide en deuxième saison L'arachide et le coton sont des cultures très importantes dans la région Le coton est utilisé en rotation Utilisation de sarclage
Zou	Abomey, Agbangnizoun, Bohicon, Cove, Zangnanado, Za-kpota	Subéquatorial avec deux saisons de pluies. -800 à 1200 mm par an à l'Ouest -1 000 à 1 400 mm par an en Est	-Terre de barre rhodique décoloré -Sols lessivés et faciles à cultiver -Sols principalement dégradés	Fourré arbustif dense dominé par le palmier à huile et les herbes	- Les cultures primaires sont le maïs (utilisé en rotation), l'arachide et le manioc. -Disparition d'igname -Présence abondante de palmier à huile + vignoble -Présence de coton dans certaines zones sèches - Système de cultures sans labour
Zou	Zogbodomé	Subéquatorial avec deux saisons de pluies de 800 à 1 200 mm par an à l'ouest et 1 000 à 1 400 mm à l'est	- Sols très profonds d'argile et d'humus -Fertiles mais souvent hydromorphes et difficiles à travailler	Forêt dense semi-décidue avec de grands arbres	- Système de cultures sans labour avec du maïs utilisé en rotation, niébé, manioc + marais)
Zou	Quinhi	Subéquatorial avec deux saisons des pluies de 1 000 à 1 400 mm par an	- Sols alluviaux très fertiles -Sols sableux moins fertiles sur la côte	- Savane-prairie -Formation de raphia marécageuse - Des mangroves	- Système basé sur le maïs (utilisé en rotation) + système de culture du niébé et des marais - Dominance du maïs / manioc dans les zones sablonneuses - Culture sur butte ou sur terrain plat.

Sources : Vodounon et al. (2016) & Nacoulma et Guigma (2015)^a Igue et al. (2017)^b.

2.7 Autres organisations travaillant sur les CCEV

L'INRAB est l'institution publique chargée de la recherche scientifique et technique. En 2016, la GIZ a collaboré avec l'INRAB, le SISIP et l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA) pour promouvoir la culture de plusieurs CCEV, et a été en mesure de produire un document technique et d'information sur l'analyse des travaux de recherche et d'innovation pour la gestion durable des terres au Bénin. Le document présente un certain nombre de technologies promues par l'institution de 1996 à 2015. L'INRAB a notamment introduit 10 variétés de niébé, des études sur le *Mucuna* (qui occupaient le devant de la scène) et la promotion des systèmes de culture suivants :

- Technique de production de maïs durable sur pois d'Angole, *Mucuna*, *Aeschynomene* et *Stylosanthes* par semis direct à la canne et incorporation de la culture en fin de saison.
- Production durable de manioc dans un système de culture sédentaire avec une intégration de *Gliricidia* et *Aeschynomene*.
- Production durable d'ignames de qualité dans un système de culture sédentaire avec une intégration de *Mucuna*, *Gliricidia*, *Aeschynomene* et *Stylosanthes*.
- Production de graines d'igname par mini-fragmentation (minissett) en incorporant le *Mucuna* comme culture de couverture.
- Production durable d'igname dans un système de semis direct de couverture de *Pueraria phaseoloides*.

2.8 Adoption des CCEV

En 1987, le *Mucuna* a été introduit dans le village de Zouzou, au sud du Bénin, par le *Projet de Recherche Appliquée à la Ferme* (RAMR) mis en œuvre par le Ministère du Développement Rural (MRD) du Bénin d'alors, l'IITA, et l'Institut Tropical Royal des Pays-Bas. L'objectif était de remédier au grave déclin de la fertilité des sols dans la région grâce à des parcelles de démonstration établies principalement dans des écoles locales. En 1988, le projet a testé la jachère du *Mucuna*, l'engrais azoté, les haies de pois d'Angole et les cultures intercalaires avec 20 agriculteurs, où la suppression de l'infestation par *Imperata cylindrica* par le *Mucuna* a été observée. Les agriculteurs ont également découvert que le *Mucuna* était un bon fourrage pour le bétail. En 1989, l'INRAB a constaté que 103 paysans des villages voisins du sud du Bénin avaient planté du *Mucuna*. Les principaux travaux de promotion des CCEV ont eu lieu vers 1996, lorsque le nombre d'agriculteurs testant la technologie *Mucuna* dans l'ensemble du Bénin était de 10 000 (Tarawali et al., 1999).

Un plus grand nombre de partenaires d'exécution ont participé au processus de transfert de technologie des CCEV afin d'améliorer la réhabilitation des sols et la fertilité dans différentes régions du Bénin. Par exemple, les Centres d'Action Régionaux pour le Développement Rural (CARDER) du Bénin, en étroite collaboration avec Sasakawa Global 2000 (SG, 2000), ont accéléré ce processus d'adoption spontanée dans six départements, à savoir l'Atacora, l'Atlantique, le Borgou, le Mono, l'Ouémé et le Zou. D'après Manyong et al. (1998), l'adoption du *Mucuna* dans la province de Mono permettrait d'économiser environ 6 500 tonnes d'azote par an. Malgré le taux élevé d'adoption initiale du *Mucuna* par la majorité des agriculteurs du sud du Bénin, l'engouement a ensuite diminué en raison de contraintes de main-d'œuvre (Azontondé, 2000). En plus du *Mucuna*, les partenaires ont introduit divers autres CCEV tels que le *Aeschynomene histrix* et le niébé.

Avant le *Mucuna*, la culture de *Stylosanthes* avait été introduite au Bénin à la fin des années 1970 où l'objectif principal était l'augmentation du fourrage pour le bétail dans les zones subhumides du Bénin (Amadji et al., 2003). Contrairement à l'adoption rapide du *Mucuna* dans le sud-ouest du Bénin, l'adoption de *Stylosanthes* par les agriculteurs a été relativement faible. Cela était dû au faible régime pluviométrique, au manque de motivation des éleveurs, au régime foncier précaire, aux capacités et aux ressources limitées du personnel de vulgarisation, et à la mauvaise mise en place de la culture.

Avec le regain d'intérêt pour les CCEV observés après 2010 par le projet GIZ ProSOL, de nouvelles perspectives ont été introduites, et les agriculteurs sont actuellement entraînés à modifier leurs pratiques agricoles. Auparavant, les résidus de récolte étaient brûlés ; de nos jours, cette pratique diminue considérablement. Actuellement, les cultures de couverture sont coupées et laissées dans les champs et la culture principale est plantée directement sans labour, ce qui permet d'économiser du temps et de la main-d'œuvre. De plus, les technologies de traitement des résidus respectueuses de l'environnement, telles que le compostage ou la fabrication du biochar, sont encouragées.

2.9 Contraintes à l'adoption des CCEV

Après l'achèvement de divers projets sur les CCEV au Bénin, le niveau d'adoption de ces cultures a diminué pour diverses raisons. Les principaux défis étaient les suivants : 1) un accès limité aux semences certifiées en raison d'une mauvaise organisation du système de semences; 2) une diversité réduite et une connaissance limitée de la productivité selon les régions agro-écologiques qui ont entraîné la réduction des taux d'adoption (ProSOL-GIZ, 2015); 3) le régime foncier et la difficulté d'intégrer les cultures à cycle long, telles que le manioc et l'igname dans les CCEV (Agbokou et al., 2015); 4) une forte demande de main-d'œuvre pour la maintenance; et 5) un faible accès au crédit et aux intrants agricoles (Assogba et al., 2017).

Selon Vissoh (2006), les facteurs les plus importants influençant l'adoption des CCEV par les agriculteurs sont : l'infestation par les mauvaises herbes, les droits fonciers, le contact avec les services de vulgarisation et d'autres variables spécifiques à l'exploitation. Par contre, Adégbola et al. (2011) ont montré que les principaux facteurs qui influencent positivement la décision d'adoption par les producteurs sont : le niveau d'éducation formelle, le contact avec les agents de vulgarisation et l'orientation du marché. De même, la participation volontaire des bénéficiaires aux actions de formation est un facteur qui influence positivement l'adoption des technologies CCEV (Jasaw et al., 2014). En outre, le genre et le nombre de parcelles sous cultures, le nombre d'actifs agricoles, et l'appartenance à un groupe de vulgarisation motivent les producteurs à utiliser les CCEV (Diogo et al., 2018b ; Gbédjissokpa et al., 2018). Cependant, en raison de la variabilité climatique et des risques (Agossou et al., 2012), il devient impérieux que les producteurs utilisent des cultures de couverture pour garantir la gestion durable de leurs terres. Ainsi, la sensibilisation des producteurs à la dégradation des sols (Jasaw et al., 2014) et à ses impacts sur leur bien-être est un facteur de motivation pour qu'ils adoptent ces technologies. La baisse de la fertilité des sols, qui entraîne une baisse des rendements, conditionne l'adoption par les agriculteurs des CCEV dans leurs champs.

Au Bénin, la non-adoption du *Mucuna* est liée à des difficultés dans les activités de culture en raison de la densité élevée de la biomasse de *Mucuna*, de grains non-comestibles, de rongeurs et de reptiles, de plantes agressives supprimant d'autres cultures si elles sont cultivées en association, d'une biomasse hautement

inflammable lorsqu'elle est sèche et du manque de ressources, et l'absence d'un système spécialisé de production de semences du *Mucuna*. L'établissement d'une chaîne de valeur autour de la production de semences pourrait être une alternative. D'autre part, les caractéristiques auto-pollinisatrices des arachides et la viabilité prolongée des semences rendent la production de semences à grande échelle non-rentable du fait que les agriculteurs peuvent replanter et récolter leurs propres semences (Tsigbey et al., 2003).

En ce qui concerne l'adoption du pois d'Angole, le taux d'adoption est faible dans le nord du Bénin, mais modéré dans le sud (Assogba et al., 2017). En général, les principales contraintes sont les suivantes : le grain ne cuit pas facilement, la biomasse produite endommagée par les animaux, la biomasse sèche exposée au feu, les rendements faibles et la qualité médiocre des semences au cours de la 2^{ème} année de production, les tiges lignifiées difficiles à gérer / décomposer et non-transformées, la non-existence d'itinéraires techniques.

Les technologies efficaces sont très contraignantes et exigeantes à mettre en œuvre, quelle que soit la technologie considérée (Akpinfra et al., 2016, Baba et al., 2016). Par exemple, dans l'extrême nord et le nord-est du Bénin, zones qui sont caractérisés par des systèmes de production agro-pastoraux, la biomasse du *Mucuna* est bien appréciée par les animaux et est même thérapeutique pour eux. Par conséquent, les relations conflictuelles prévalent pour l'utilisation du *Mucuna* en tant qu'engrais vert et aliments pour animaux.

L'élevage de bétail dans la région par les éleveurs, en particulier le pâturage libre après la récolte de la culture principale, compromet l'adoption des CCEV. Par exemple, le *Mucuna* en jachère entraîne des conflits entre agriculteurs et éleveurs.

Aussi, la pression foncière due à une immigration continue dans une région donnée, par exemple le centre du Bénin, réduit non seulement le potentiel des cultures pures des CCEV, mais entraîne également la déforestation des forêts primaires et la conversion en terres agricoles pour la culture du coton, de l'arachide et du maïs.

Faiblesses dans les stratégies de sensibilisation: de plus en plus, la stratégie mise en place pour promouvoir l'adoption de technologies par les producteurs est basée sur le principe de la formation en cascade (Assogba et al., 2017). Tout d'abord, il s'agit de former des agents d'assistance technique qui, à leur tour, sont responsables de la formation des producteurs « modèles », « relais » ou « pilotes ». La formation de ces producteurs se fait autour des champs-écoles paysans, des fermes-écoles ou des parcelles de démonstration. L'objectif est de développer une expertise locale pour soutenir le support technique des producteurs et une meilleure appropriation des technologies de GDT, tout en réduisant les coûts de diffusion de la GDT et de la formation des producteurs. Cependant, la méthode de sélection des producteurs relais d'une part et le

retour des formations relais à d'autres producteurs d'autre part ne favorisent pas l'adoption durable des technologies GDT. Deuxièmement, la sélection des producteurs est effectuée par les agents techniques et les dirigeants des organisations bénéficiaires. Leur choix repose principalement sur la disponibilité de l'individu, son ouverture d'esprit et la propriété d'un terrain de démonstration. Cette méthode de sélection ne donne pas à tous les producteurs les mêmes chances de sélection que les producteurs relais. Si les ressources sont concentrées au niveau des parcelles de démonstration pour la formation des producteurs relais, elles sont pratiquement inexistantes après la formation. Ainsi, les producteurs relais reprennent rarement la formation reçue et, compte tenu du nombre élevé d'autres bénéficiaires potentiels des actions des projets, les agents techniques concentrent leurs efforts uniquement sur les producteurs relais. Ceci limite souvent les possibilités des bénéficiaires réels du projet à quelques producteurs relais, réduisant ainsi l'impact escompté de ces projets.

Considérations tardives du genre: les projets n'intègrent souvent pas la dimension de genre lors de leur phase de conception (Assogba et al., 2017). En outre, la prise en compte du genre varie selon les différents projets. Cela se traduit par l'implication des femmes dans les activités de production, de transformation et de commercialisation ou dans l'extension des technologies de GDT en tant que productrices modèles et détentrices des parcelles de démonstration.

Milieu social: après un grand enthousiasme, l'utilisation de cultures de couverture au Bénin a montré des limites dans l'acceptabilité de ces technologies par les agriculteurs (Seguy & Bouzinac, 2001). Souvent, le manque de rentabilité économique directe empêche leur adoption dans un système agricole plus intensif. L'agriculteur voit rarement la conservation de la fertilité à long terme comme un facteur de changement (Messerli & Kistler, 1999). D'autres intérêts doivent être créés pour éliminer les préjugés.

Pauvreté: les travaux de Leach et Mearns (1992) ont établi un lien de causalité théorique entre la pauvreté et l'état de dégradation de l'environnement. On peut donc se demander si les agriculteurs pauvres dégradent l'environnement des zones cultivées et adoptent moins de pratiques de jachère améliorée avec des légumineuses. La théorie a été appliquée à la situation particulière du Bénin. L'objectif principal était de déterminer l'influence du bien-être des agriculteurs sur leurs systèmes de production et leur adoption de l'agroforesterie : les cas de *Mucuna pruriens* et d'*Acacia auriculiformis* au sud du Bénin (Houngbo et al., 2012). Il a été démontré que, plus les agriculteurs sont pauvres, moins ils adoptent le *Mucuna* et plus ils exportent des nutriments du sol sans aucune stratégie de remplacement. Bien que les agriculteurs soient conscients des effets positifs des CCEV, leur taux d'adoption est généralement faible. Les agriculteurs les plus pauvres adoptent moins de technologie que tous les autres agriculteurs.

La pauvreté apparaît comme un obstacle décisif à l'adoption des CCEV au sud du Bénin en particulier et au Bénin en général (Floquet, 1998). La réduction de la pauvreté est donc nécessaire pour améliorer l'adoption de pratiques agricoles durables au Bénin. Cette lutte peut passer par la valorisation des semences par les producteurs. L'établissement d'une chaîne de valeur autour de la production de semences pourrait être une alternative.

Régime foncier: pour la plupart des populations rurales des pays en développement, mis à part la population active, la terre est le principal facteur de production et reste souvent le seul actif avec lequel la richesse peut être générée et développée (Vendryes, 2014). La question de la sécurité foncière est souvent identifiée dans les documents de stratégie pour la réduction de la pauvreté comme un axe majeur de la promotion de la croissance agricole et donc de la réduction de la pauvreté. Cette vision repose sur des raisons théoriques selon lesquelles la sécurité d'occupation favorise l'investissement agricole, l'accès au crédit (parce que les terres peuvent servir de garantie), l'adoption de pratiques de gestion durable de la fertilité des sols et la productivité agricole (Abdulai et al., 2011).

Contexte CCEV: chaque CCEV a des situations spécifiques dans lesquelles il peut être adopté et celles-ci doivent être identifiées en tant que condition préalable. Pour les arbustes légumineux et les herbacées comme le *Mucuna*, ils ont été identifiés comme : production secondaire par la culture de couverture, forte pression des mauvaises herbes à traiter, sol suffisamment riche pour supporter les cultures principales et secondaires, réduction du temps de travail et réponse positive de la culture principale à la culture de couverture (Carsky et al., 2001 ; Schulz et al., 2001 ; Hauser et al., 2002).

2.10 Conclusions de la revue littéraire

Les CCEV ont une influence positive sur la production agricole et la fertilité du sol. Afin de continuer à promouvoir les CCEV, il est nécessaire de se concentrer sur les semences CCEV de qualité. Les semences améliorées à haute viabilité devraient être facilement accessibles et abordables pour les agriculteurs. Le développement de nouvelles accessions de cultures de couverture légumineuses et graminées capables de tolérer la variabilité météorologique dans différentes zones agro-écologiques et pouvant être utilisées dans différents systèmes d'utilisation des terres. Des générations et distribution de semences compatibles avec les systèmes de culture ; par exemple, le comportement de croissance (vertical, concurrence minimale pour la lumière et l'humidité) devrait convenir à l'utilisation en culture intercalaire. L'introduction de CCEV favorables aux utilisations multiples encourage l'adoption par les agriculteurs, car ils peuvent être utilisés pour améliorer les sols, protéger les cultures, et nourrir les animaux. Il est nécessaire d'améliorer les connaissances des agriculteurs sur la culture et l'utilisation du CCEV. Cela pourrait aider à éliminer les croyances acquises sur certains CCEV qui affectent négativement leur adoption par les petits exploitants. La caractérisation économique (traitement après récolte, commercialisation) et l'identification de niche pour les CCEV devraient également faire partie des recherches futures. Les agriculteurs devraient être sensibilisés aux pratiques améliorées, en plus du pâturage collectif dans les champs agricoles qui provoque le compactage, et de l'intégration des CCEV dans de telles pratiques pour la réhabilitation des sols. Au Bénin, le gouvernement devrait sensibiliser le public à la nécessité d'une compréhension mutuelle et de la coexistence entre les agriculteurs arables en conflit et les éleveurs.



© Rolf Sommer/ Alliance of Bioversity International and CIAT

3. Évaluation agronomique : caractéristiques des systèmes d'exploitation et utilisation des CCEV

La présente étude a été réalisée dans les communes d'intervention du ProSOL, avec les producteurs encadrés par les techniciens des structures partenaires du ProSOL. Elle a été effectuée dans quatre départements correspondant à quatre ZAE d'intervention du ProSOL (Figure 3). Il s'agit du Zou (Commune de Zagnanado), des Collines (Commune de Bantè), du Borgou (Bembéréké) et d'Alibori (Kandi).

3.1 Présentation des communes

Kandi

La commune de Kandi est localisée au centre du département de l'Alibori et appartient à la ZAE cotonnière du nord-Bénin. Située entre 10°55' et 11°39' de latitude nord et 2°38' et 3°15' de longitude est avec une superficie de 3 421 km² ; soit 13 % de l'ensemble du département. Limitée au nord par la commune de Malanville, au sud par la commune de Gogounou, à l'est par la commune de Ségbana, et à l'ouest par celle de Banikoara, la ville de Kandi est une ville carrefour aussi bien au plan national que sous régional. Sur le plan agricole, elle se classe au deuxième rang des communes productrices de coton et vient également après la commune de Kérou en ce qui concerne le maïs (MAEP, 2015). Deux saisons bien marquées sont observées dans la commune : une saison pluvieuse de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. On y rencontre des sols ferrugineux tropicaux lessivés hydromorphes dans certains arrondissements tels que Kassakou et Angaradébou.

Bembéréké

La commune de Bembéréké est l'une des huit (8) communes du département du Borgou. Comprise entre 09°58' et 10°40' de latitude nord et entre 02°04' et 03° de longitude est, elle est limitée au nord par la commune de Gogounou, au sud par la commune de N'Dali, à l'ouest par la commune de Sinendé et à l'est par les communes de Nikki et de Kalalé, respectivement situées dans sa partie sud-est et nord-est. Le climat est de type tropical sec caractérisé par deux saisons distinctes : une saison pluvieuse allant d'avril à octobre, et une saison sèche allant de novembre à mars. La moyenne pluviométrique annuelle est de 1 188 mm (MAEP, 2015). Les sols appartiennent à la classe des sols ferrugineux tropicaux (Viennot, 1978). La végétation correspond à celle de la savane arborée soudano-guinéenne.

Bantè

La commune de Bantè est l'une des six (6) communes du département des collines. Elle est limitée au nord par la commune de Bantè, au sud par la commune de Savalou, à l'Est par les communes de Glazoué et de Ouèssè et à l'Ouest par la République du Togo. Situé entre entre 08°4' et 08°37' de latitude nord et 01°36' et 2°11' de longitude est, la commune de Bantè appartient à la zone de transition climatique entre le climat subéquatorial de la côte et le climat tropical sec du nord-Bénin, et est entièrement occupée par des sols ferrugineux tropicaux lessivés ou appauvris (Igué et al., 2013). On y rencontre également des sols noirs et hydromorphes dans les vallées de cours d'eau qui traversent la zone. À cause des hauteurs de pluie observées dans la région, les sols sont pour

la plupart érodés par le ruissellement des cours d'eau conduisant ainsi au lessivage des superficies agricoles déjà appauvries par les cultures.

Zagnanado

La commune de Zagnanado est située au nord de la dépression de la Lama entre 7° et 7°30' latitude nord et 2°15' et 2°30' longitude est. Elle est limitée au nord par la commune de Dassa-Zoumè, au Sud par les Communes de Ouinhi et de Zogbodomey, à l'est par les communes de Kétou, Adja-Ouèrè et à l'ouest par les Communes de Covè, Za-Kpota et Djidja. On note ainsi dans la zone quatre saisons : deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. Cette commune est caractérisée par trois grandes catégories de sols (Hounsou et al., 2020) :

- Les sols ferrugineux tropicaux lessivés ;
- Les sols ferrallitiques sur grès et matériaux colluviaux ou sédiments argilo-sableux du continental terminal qui sont des sols profonds plus ou moins rubéfiés ;
- Les sols hydromorphes à pseudo-gley sur sable, puis à pseudo-gley sur matériaux alluviaux argileux des vallées et des plaines argileuses. Ils se trouvent le long des cours d'eau, principalement dans les arrondissements de Dovi et de Kpédékpo.

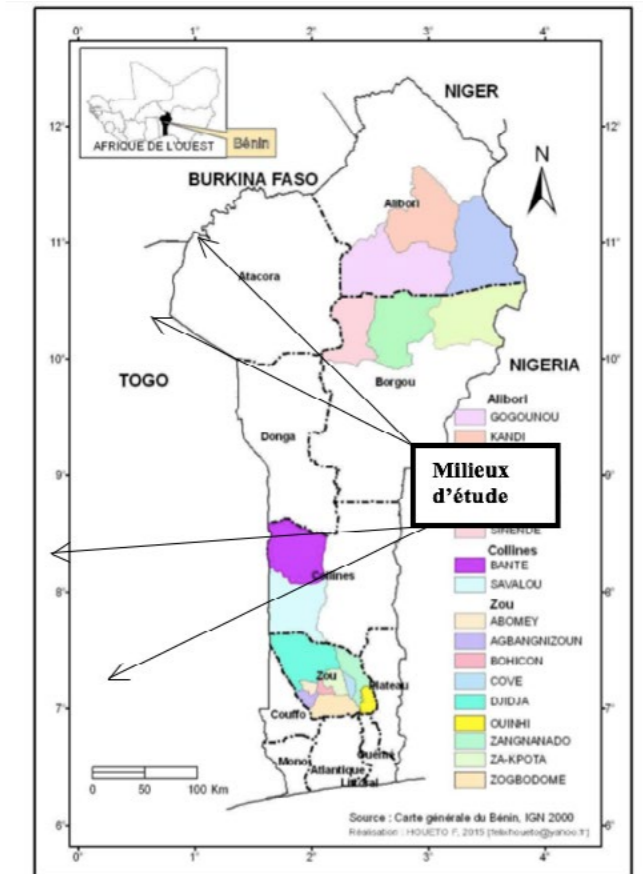


Figure 3: Localisation des communes d'étude

3.2 Identification et prise de contact avec les producteurs

Il a été organisé une rencontre avec les techniciens du ProSOL en charge de l'appui aux agriculteurs pour discuter des critères de choix des sites expérimentaux, parmi lesquels la disposition de parcelles (au moins 1 000 m²) sous CCEV (*Mucuna* ou *Cajanus cajan*) pour une période d'au moins un à deux ans et de parcelles sans CCEV était primordiale. Aussi, les producteurs devraient être disposés à produire la même culture sur les deux types de parcelles. Ensuite, une visite dans les champs des agriculteurs a été faite pour la sélection des sites. Au total, 20 agriculteurs ont été sélectionnés par ZAE. Cependant, du fait des contraintes techniques et de la disponibilité des producteurs, entre 10-15 agriculteurs par ZAE ont réellement participé aux essais (Tableau 4). Les expérimentations étaient installées et suivies par des étudiants de la faculté d'Agronomie de l'Université de Parakou sur des parcelles ayant reçu soit le pois d'angole (*Cajanus cajan*) soit le *Mucuna*. Elles ont été installées dans les localités concernées (Figure 4).

Le tableau 4 présente la répartition du nombre de producteurs ayant participé aux essais en milieu réel.

Tableau 4: Répartition des essais par commune, culture et type de CCEV

Types de CCEV	Maïs			Coton		
	<i>Cajanus Cajan</i>	<i>Mucuna</i>	Total Commune	<i>Cajanus Cajan</i>	<i>Mucuna</i>	Total Commune
Kandi	12	1	13	14	1	15
Bembéréké	10	3	13	9	3	12
Bantè	7	8	15	5	8	13
Zagnanado	9	1	10	0	0	0
Total	38	13	51	28	12	40

Au total pour le maïs, 51 producteurs ont participé à l'essai dont 38 ont utilisé *Cajanus cajan* et 13 *Mucuna*. Pour le coton, 40 producteurs ont installé les essais dont 28 ont utilisé *Cajanus cajan* et 12 *Mucuna*. La prédominance du *Cajanus cajan* ne traduit pas une préférence des producteurs à cette CCEV, mais est plutôt liée au retard d'installation des étudiants. Les agriculteurs qui ont mis en culture le *Mucuna* ont installé la culture subséquente dès l'arrivée des pluies.



Figure 4: Séance d'échange et d'installation des étudiants avec les producteurs de Bantè (à gauche) et de Zagnanado (à droite).

3.3 Matériel utilisé

Matériel végétal

Deux catégories de matériel végétal ont été utilisées dans ces essais : les (CCEV) *Mucuna* et *Cajanus cajan* et les cultures tests maïs et coton

a. Cultures de Couverture et Engrais Verts (CCEV)/ Green Manure Cover Crops (GMCC)

- *Mucuna*

Le *Mucuna* est une légumineuse annuelle cultivée pour son fourrage de bonne qualité, ses graines et son énorme capacité de fixation d'azote atmosphérique au niveau du sol. Le genre *Mucuna* appartient à la famille des Fabaceae (légumineuses) et englobe environ 150 espèces de légumineuses annuelles et pérennes (Ido Ebou, 2016).

Le *Mucuna* est une bonne source de nutriments et de minéraux. Il constitue aussi une source importante de protéines (MAT) qui est primordiale dans l'alimentation des animaux de même que dans la restauration et le maintien de la fertilité des sols (Vissoh et al., 1998). Pour la production, Carsky et al. (1999) cités par Vissoh et al. (1998) ont trouvé une quantité de biomasse comprise entre 5,7 t MS/ha à 7,9 t MS/ha. Vissoh et al. (1998) ont estimé que le *Mucuna* cultivé en jachère annuelle fourni un équivalent de plus de 100 kg d'azote par hectare (N/ha). Un taux de N de 6% a été rapporté par Carsky et al. (2001) dans la biomasse. La production de N des variétés *cochinchinensis*, *deeringiana* et *nagaland* par hectare a été évaluée respectivement à 172 kg, 169 kg et 148 kg (Eilitta et al., 1983). Le potassium (K) et le phosphore (P) sont des minéraux très présents dans la biomasse de *Mucuna* (Eilitta et al., 1983). Ces auteurs ont trouvé respectivement

6,6 kg/ha, 6,2 kg/ha et 5,5 kg/ha de P chez les variétés *cochinchinensis*, *deeringiana* et *nagaland* au sud du Mexique.

- *Cajanus cajan*

Le pois d'Angole (*Cajanus cajan* (L.) Millspaugh) est une plante qui appartient à la famille des Fabaceae (Wu et al., 2009). C'est une importante légumineuse à graine cultivée sous les tropiques, y compris les zones semi-arides. Sa production annuelle, estimée en moyenne à 3,1 millions de tonnes, représente environ 5% de la production mondiale des légumineuses à graines. Avec cette production, le pois d'Angole est la sixième légumineuse à graine la plus importante du monde (Pazhamala et al., 2015). Il est cultivé en agriculture pluviale, dans les régions tropicales semi-arides. Il constitue une importante légumineuse à graines dans les zones tropicales, notamment en Afrique de l'Ouest. Au Bénin, Ayenan et al. (2017), évaluant les connaissances des producteurs sur l'utilisation médicale du *Cajanus cajan*, ont trouvé qu'il est cultivé pour la consommation ainsi que le traitement des pathologies telles que la malaria, le vertige, la rubéole et les affections oculaires. *Cajanus cajan* joue également un rôle clé dans la régénération et la protection des sols. En effet, il est capable de fixer l'azote et de rétrocéder tout ou une partie au sol pour les cultures subséquentes, d'étouffer efficacement les adventices, mais encore d'améliorer la fertilité et le contrôle de l'érosion des sols (Odion et al., 2007). Également, grâce à son système racinaire puissant, la plante arrive non seulement à remonter les éléments nutritifs qui ont percolé, mais surtout améliore la structure des sols en cassant les croûtes dures. En outre, elle peut fixer jusqu'à 235

kg/ha d'azote (Peoples et al., 1995) et laisser environ 40 kg par hectare de résidus azotés au sol (van der Maesen, 2006). Le pois d'Angole a une capacité exceptionnelle d'utilisation des fractions de phosphore peu disponibles et celles notamment liées aux oxydes de fer, ce qui rend sa fertilisation généralement inutile ; il améliore significativement la fertilité des sols (van der Maesen, 2006). Au Nigeria, des essais de rotation avec des résidus de *Cajanus cajan* ont permis d'augmenter de 50 % le rendement du maïs par rapport à la culture sans engrais (Hulugalle et Lal, 1986).

b. Les cultures tests

- Le maïs (*Zea mays* L., 1753),

Il est la principale céréale intervenant dans l'alimentation des populations (Adjanohoun et al., 2012). C'est spécifiquement la variété QPM

(maïs à fortes teneurs en protéines, *Quality Protein Maize* en anglais) Faaba, synonyme de OBATAMPA qui a été utilisée. Elle est une variété à pollinisation libre de 105 jours. Le recouvrement de l'épi est très bon. Les grains, de couleur blanche, sont de types dentés cornés, mi-farineux, mi-vitreux et riches en acides aminés indispensables à l'organisme (Lysine et Tryptophane) avec son potentiel productif de 3,5 tonnes/ha en milieu réel (MAEP, 2015).

- Le Coton (*Gossypium hirsutum* L., 1763)

Le coton est la principale culture d'exportation du Bénin. Les caractéristiques des variétés cultivées en fonction des zones agro-écologiques sont résumées dans le tableau 5.

Tableau 5: Caractéristiques des spéculations utilisées dans les communes d'étude

N°	Nom de la Variétés	Zones agro-écologiques	Communes	Productivité coton graine (kg/ha)	Poids moyen capsulaire (g)
1	E 956-2 ou ANG 956	Zone cotonnière du Nord	Kandi	2 713	5,5
2	K 768-3 ou OKP 768	Zone vivrière du Sud Borgou	Bembéréké	1 796	5,7
3	K 768-3 ou OKP 768	Zone des terres de barre	Bantè	1 796	5,7

Source : Fiches descriptives des variétés de cotonnier (*Gossypium hirsutum*)

Fumure

La pratique proposée aux agriculteurs est : NPKSB coton 14/18/18/6/1 et le NPKSBZn maïs 13/17/17/0,5/6/1,5 utilisés à la dose de 150 kg/ha 15 jours après semis, puis l'urée 46% à la dose de 50 kg/ha apporté 45 jours après semis.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est fait d'une parcelle de 10m x 10m, conformément au protocole élaboré par CIAT (Figure 5). À ce dispositif, il a été ajouté 4 parcelles de 4m x 4m de dimensions pour les quatre traitements de l'essai (2 sur parcelles de précédent de CCEV et 2 sur parcelles sans précédent de CCEV) (Tableau 6).

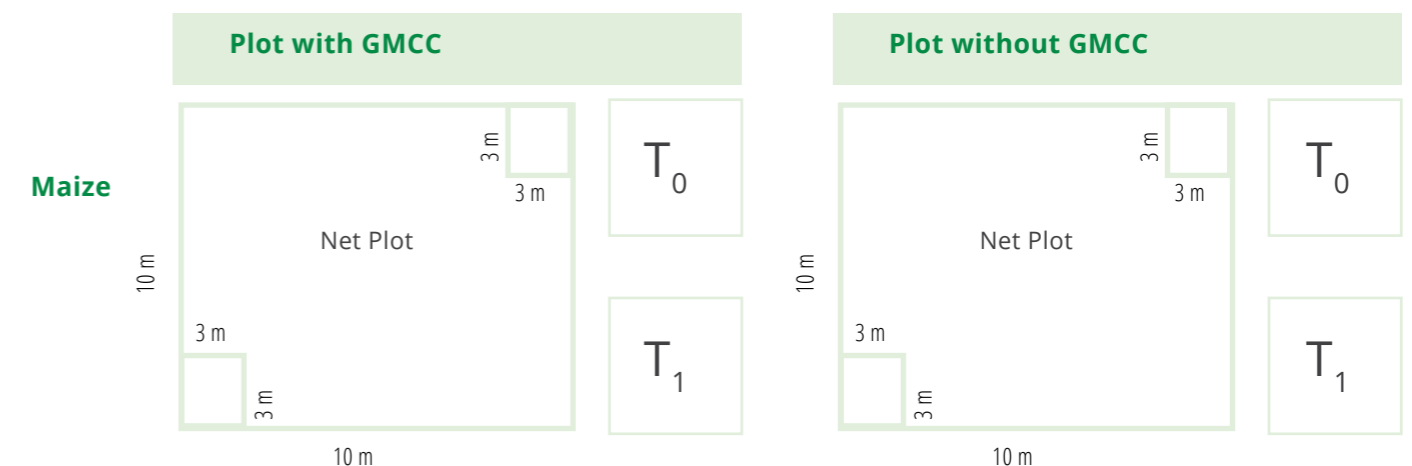


Figure 5: Dispositif des essais chez un producteur pour la culture de maïs.

Tableau 6: Description des traitements de l'essai

Traitements	Parcelles sans CCEV	Parcelles avec CCEV
T0	Zéro absolu	Aucun apport de fertilisant
T1	Pratique paysanne vulgarisée 150kg de NPK + 50kg urée/ha	Apport complémentaire de la demi-dose de la pratique paysanne vulgarisée 75kg NPK+ 25kg urée/ha

Collecte de données

a) Matériel

Le matériel utilisé sur le terrain est composé de:

- Tarière hollandaise ;
- Seau en plastique pour mélanger les échantillons prélevés de sol sur une même parcelle ;
- Système de localisation par satellite (GPS) ;
- Sachets pour le prélèvement d'échantillon de sol ;
- Papiers pour l'étiquetage ;
- Marqueurs ;
- Couteau ;
- Infiltromètre ;
- Pénétrromètre ;
- Humidimètre.

b) Types de données collectées

Sur le maïs : le poids épis, le poids grains et le poids par parcelle élémentaire ont été évalués à la fin de l'expérimentation à l'aide d'un peson électronique. Le taux d'humidité de ces grains par parcelle a été déterminé avec un humidimètre.

Sur le coton : à la récolte, le poids des fibres par parcelle élémentaire a été mesuré avec un peson électronique.

c) L'infiltration d'eau des parcelles

L'infiltromètre à disque est un instrument couramment utilisé aujourd'hui pour la mesure *in situ* de la conductivité hydraulique des sols. Le principe de cet appareil consiste à mesurer le flux d'infiltration de l'eau dans le sol à travers un disque. Le potentiel de l'eau à l'interface disque/sol est constant au cours du temps et prédéterminé par l'utilisateur.

La conductivité hydraulique (K) est le paramètre physique qui nous permet ici d'apprécier l'infiltration d'eau dans les sols des parcelles ayant fait l'objet d'étude.

La conductivité hydraulique (K) est l'aptitude d'un milieu poreux à conduire et à transmettre de l'eau. Elle est très liée à la texture des sols. La méthode utilisée pour la détermination de la conductivité hydraulique est celle de Zhang (1997), couplée au modèle mathématique de Van Genuchten (1980).

Les données de l'infiltration d'eau des sols de 4 producteurs ont été analysées sur les deux types de parcelles étudiées (Avec et Sans CCEV). Sur chaque parcelle, quatre mesures d'infiltrations d'eau ont été réalisées.

d) La compaction des sols

La résistance de pénétration est un indice permettant d'apprécier la compactibilité des sols de cultures. Les données de compaction ont été collectées dans les champs de maïs et coton chez quatre producteurs par spéculation sur les parcelles avec et sans CCEV. Sur les parcelles, les données ont été prises sur des surfaces non labourées et n'ayant pas reçu de traitements. Ainsi, 16 répétitions de données ont été collectées.

e) Échantillonnage et analyse du sol

Avant l'expérience, deux prélèvements de sol (un sur parcelle avec CCEV et un sur parcelle sans CCEV) ont été effectués à la profondeur de 0 à 20 cm suivant la méthode des diagonales, puis mélangés pour constituer un seul échantillon composé. Ces échantillons ont été analysés pour déterminer la granulométrie, le pH, le carbone et l'azote au laboratoire du CIAT à Nairobi au Kenya.

f) Données biomasses

Chez tous les producteurs, l'incorporation est faite avec les brindilles et les feuilles. Il a été choisi cinq plantes sur lesquels ont été mesurés les poids des brindilles et des feuilles à l'aide d'un peson. Ensuite, un échantillon de 100g de feuilles plus brindilles sur chacun de ses plantes a été prélevé pour les analyses des laboratoires suivant le protocole CIAT.

g) Évaluation des rendements et taux d'accroissement

Le rendement en grains (Rdt) du maïs a été estimé de la façon suivante :

$$Rdt = 0,75 P (100 - h) / (100 - 12) \text{ (Akanvou et al., 2009)}$$

Où, P représente le poids des épis, 0,75 le coefficient représentant le ratio poids grains : poids épis, h le taux d'humidité des grains estimé à la récolte.

Traitement des données

Le logiciel Microsoft Excel a été utilisé pour la saisie et le traitement des données. Les données de rendement ont été analysées avec le logiciel statistique R (R Core Team, 2018) au seuil de significativité de 5%, en utilisant le modèle linéaire à effet mixte avec trois facteurs fixes (zone agroécologique, traitement et précédent cultural) en considérant le nord (zone soudanienne) et le centre

(zone soudano-guinéenne), alors que le producteur est considéré comme bloc et donc un facteur aléatoire. Les packages AICcmodavg, lmerTest, lsmeans ont permis d'analyser les effets des facteurs fixes et aléatoires. Ensuite, nous avons procédé à un test de comparaison multiple des moyennes (SNK)

en utilisant le package agricole pour déceler les différences significatives entre les traitements.

Les résultats de l'analyse des sols ont été soumis à une analyse de variance à deux critères pour l'ensemble de l'étude.

3.4 Résultats et discussion

Effets des systèmes de culture sur les propriétés chimiques des sols des communes investiguées

Les résultats de l'analyse de variance à deux critères de classification consignés dans le tableau 7 montrent qu'en général les sols sont légèrement acides, sauf dans les communes de Bantè et Zagnanado (avec CCEV) où les pHs déterminés sont neutres. Les résultats pour le pH montrent des différences significatives entre les systèmes de production pour les communes de Bantè, Kandi et de Bembéréké. Les valeurs d'azote observées sont faibles et significatives entre Bantè et les autres communes. Le taux de matière organique est moyen à Bantè et faible dans les autres communes. Le taux de matière organique le plus élevé est obtenu sur parcelles de précédent de CCEV à Bantè, alors que le plus faible l'est à Zagnanado. Sans précédent de CCEV, le taux de matière organique le plus élevé est également obtenu à Bantè et le plus faible est également obtenu à Zagnanado.

Tableau 7: Quelques propriétés chimiques des sols au début de l'essai dans 4 ZAE du Bénin

Communes	Système de culture	ddl	pH	Azote total (%)	Carbone total (%)	Matière organique (%)	C/N
Bantè	Without GMCC	94	7,37a	0,19 ^a	2,18 ^a	3,75	11,46
	With GMCC	94	7,06ab	0,20 ^a	2,32 ^a	3,99	11,58
Bembéréké	Without GMCC	94	6,37cd	0,06 ^b	0,58 ^b	1,00	9,21
	With GMCC	94	6,41cd	0,05 ^b	0,57 ^b	0,99	11,46
Kandi	Without GMCC	94	6,69bcd	0,04 ^b	0,45 ^b	0,77	10,93
	With GMCC	94	6,26d	0,05 ^b	0,64 ^b	1,10	12,8
Zagnanado	Without GMCC	94	6,48bcd	0,02 ^b	0,25 ^b	0,43	12,35
	With GMCC	94	7,07abc	0,04 ^b	0,54 ^b	0,92	13,72
P value			0,000	0,000	0,000		

ddl = degré de liberté.

Les faibles valeurs de l'azote total observées correspondent aux caractéristiques des sols ferrugineux tropicaux (Sanchez & Jama, 2002) qui couvrent 60% du Bénin et se retrouvent dans les communes de Bantè, Bembéréké et Kandi (Agossou, 1983). Ces sols sont reconnus pauvres en azote et en phosphore et une stratégie palliative passe forcément par une gestion rationnelle des terres agricoles (Igué et al., 2017). La rotation CCEV-maïs a amélioré la matière organique du sol dans la plupart des communes. La matière organique représente l'indicateur principal et déterminant de l'activité biologique (Mrabet et al., 2012) du sol. Le taux de matière organique le plus élevé est obtenu sur parcelles de précédent de CCEV à Bantè, alors que le plus faible l'est à Zagnanado. Sans précédent de CCEV le taux de matière organique le plus élevé est également obtenu à Bantè et le plus faible est obtenu à Zagnanado. Ce taux moyen de matière organique obtenu à Bantè illustre bien l'état de fertilité moyenne dans le Centre Bénin, comme l'a observé Igué et al. (2017) en évaluant l'état de fertilité de 1500 échantillons de sol de 17 communes du Bénin. Les mêmes auteurs sont parvenus à la conclusion que la perte de la fertilité des sols est généralisée à toutes les terres cultivées au Bénin et est due à la mauvaise gestion des terres par suite du niveau technologique encore faible des paysans.

Effets des systèmes de culture sur les propriétés physiques des sols cultivés

a) Compaction du sol

Les figures 6 et 7 présentent l'évolution de la compaction du sol dans quatre communes du Bénin. Elles montrent que globalement la compaction du sol est plus forte dans la commune de Zagnanado que dans la commune de Bantè et elle l'est d'autant plus encore sur parcelles sans précédent de plantes de couverture.

Le travail du sol est l'une des principales composantes des systèmes de cultures. Il permet entre autres de créer une structure propice (Schmidt et al., 1994) en vue de favoriser l'enracinement et assurer ainsi un bon ancrage, une bonne alimentation en eau et en nutriments des cultures en palliant aux difficultés liées au tassement des sols qui entraînent une diminution de l'espace des vides entre les éléments du sol, et une augmentation de la densité apparente du sol (Lipiec et al., 1991). L'état de compaction du sol traduit donc la résistance du sol à la pénétration qui peut également dépendre de la structure du sol. La compaction est un problème particulièrement important pour la gestion des sols, car elle influence la structure du sol (Batey, 2009). Nos résultats montrent que le tassement du sol est élevé à Zagnanado et est caractérisé par un sol ferrallitique de très faible fertilité (Adjanohoun et al., 2006), surtout sur 10 et 15 cm comparé à Bantè (Figure 6). La même tendance est observée à Bembèrèké comparé à Kandi (Figure 7). Les principales causes du tassement du sol sont liées directement ou indirectement au développement de la mécanisation. La cause indirecte est l'appauvrissement du sol en matière organique, dû à certaines modifications des pratiques culturales (N'Guessan et al., 2015). La matière organique est très faible sur les parcelles sans CCEV à Zagnanado, de l'ordre de 0,43% passant à plus du double (0,92%) sous l'effet des CCEV. Ceci explique donc la réduction de la compaction du sol constatée sur les parcelles avec CCEV. Ces observations sont en accord avec les résultats de Fikri et al. (2004) qui ont affirmé que la matière organique a une influence majeure sur les propriétés physiques et chimiques des sols et par ricochet sur le rendement des cultures.

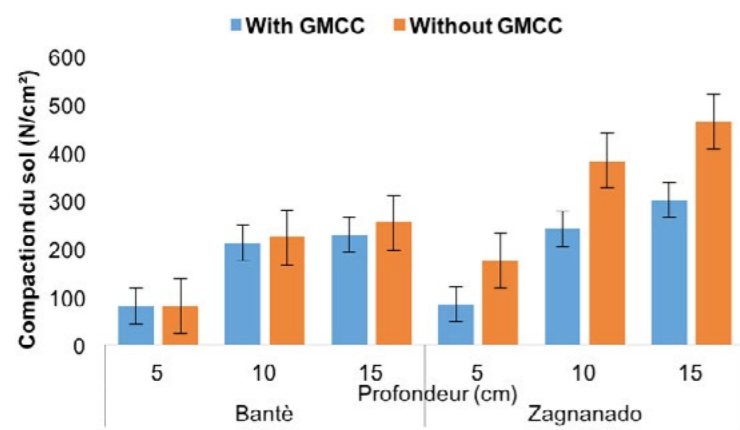


Figure 6: Évolution de la compaction du sol sur 5, 10 et 15 cm en fonction des systèmes de culture au centre Bénin (Bantè et Zagnanado).

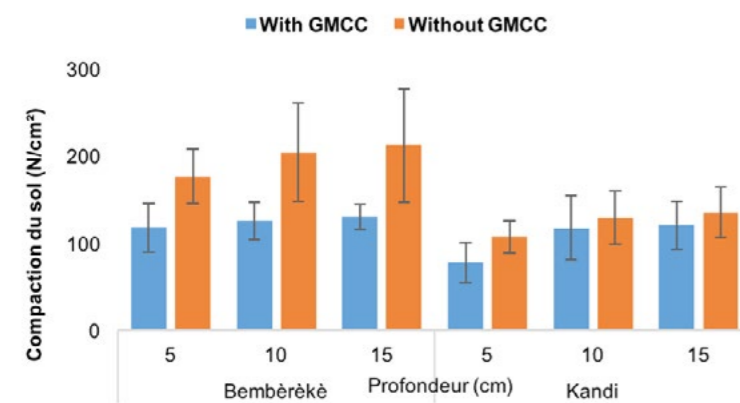


Figure 7: Évolution de la compaction du sol sur 5, 10 et 15 cm en fonction des systèmes de culture au Nord Bénin (Bembèrèké et Kandi).

b) Infiltrométrie

Les valeurs moyennes calculées pour la conductivité hydraulique des parcelles étudiées sont représentées par les figures 8 et 9. Les résultats montrent une variabilité de la conductivité hydraulique (K) en fonction des systèmes de cultures. Les parcelles sans CCEV ont montré des valeurs de K faibles indiquant une faible infiltration de l'eau dans le sol. Au niveau de Kandi (Figure 8) et Bantè (Figure 9), les valeurs de K enregistrées sont significativement plus élevées sur parcelles de CCEV par rapport aux parcelles sans CCEV.

En général, la conductivité hydraulique augmente de 33-51% sur les parcelles traitées aux CCEV au centre (Figure 9) contre 29-66% sur les mêmes parcelles au nord, comparativement aux parcelles sans CCEV (Figure 8).

La perméabilité d'un sol est sa capacité à faire infiltrer l'eau. Elle dépend de la texture du sol et de sa structure (homogène, fissures, etc.) des propriétés du fluide qui s'écoule (Viscosité, densité) et du degré de saturation du sol (Nimmo et al., 1987). Plus un milieu est perméable (grand K), plus l'eau s'y infiltre. Un sol est considéré comme imperméable lorsque le coefficient K est inférieur à 10^{-8} m/s. À l'inverse, au-delà de $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, le sol est considéré comme très perméable et son aptitude à l'infiltration est excellente.

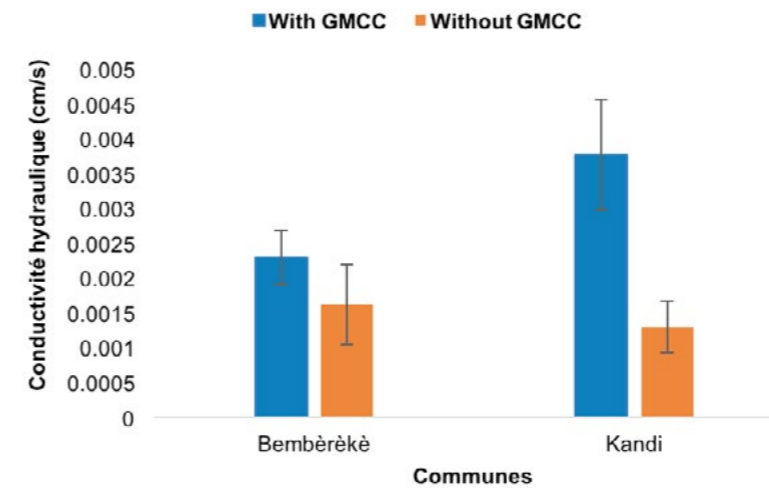


Figure 8: Évolution de la conductivité hydraulique (K, en cm/s) sur parcelles ayant reçu de précédent de plantes améliorantes (+CCEV/with GMCC) ou non (-CCEV/without GMCC) dans deux communes du nord Bénin (Bembèrèké et Kandi).

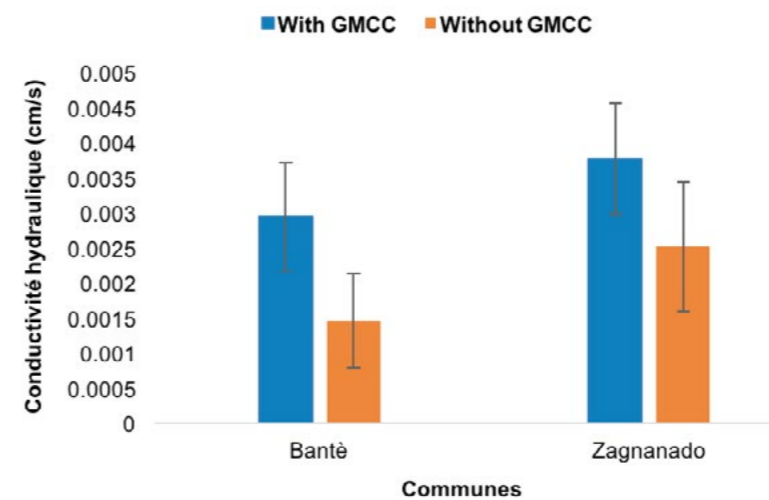


Figure 9: Évolution de la conductivité hydraulique (K, en cm/s) sur parcelles ayant reçu de précédent de plantes améliorantes (+CCEV/with GMCC) ou non (-CCEV/without GMCC) dans deux communes du centre Bénin (Bantè et Zagnanado).

Ces résultats prouvent que la dégradation des sols est avancée et l'utilisation des CCEV peut contribuer à son amélioration. Ces faibles valeurs de conductivité hydraulique des sols sans CCEV traduisent une forte activité anthropique sur ceux-ci (cultures et élevages). Ces observations corroborent celles de N'Guessan et al. (2015) qui ont observé que dans le nord de la Côte d'Ivoire, le piétinement du bétail et la dégradation de la strate végétale modifient la structure du sol (fermeture des pores, tassement, etc.). La faible teneur en matière organique relevée dans les parcelles sans CCEV à Zagnanado à également favorisé la compaction de celles-ci (Naitormbaide et al., 2012). La compaction entraîne donc l'augmentation de la densité apparente du sol et de la diminution de la conductivité hydraulique (Håkansson & Reeder, 1994). La couverture

végétale est un facteur important et l'utilisation de plantes légumineuses contribue à limiter l'érosion, le ruissellement, le taux d'évaporation ainsi que l'augmentation de la capacité de rétention des sols (Roose, 2015), permettant ainsi une bonne gestion des sols pour une production durable. La plupart des sols compactés et imperméabilisés ne sont plus en état de remplir correctement leurs fonctions environnementales, en particulier celles qui ont trait à l'infiltration de l'eau et à la croissance des végétaux. C'est ce qui expliquerait les faibles récoltes obtenues sur les parcelles sans précédent de CCEV sur les différents sites étudiés.

Effets des systèmes de culture et de l'engrais minéral sur le rendement du maïs et du coton en fonction des communes

Les résultats de l'analyse de variance pour le facteur aléatoire et les facteurs fixes pour les deux cultures sont consignés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Résultats de l'analyse de variance pour les facteurs aléatoires et fixes pour le maïs et le coton

Facteurs	Maïs	Coton
Bloc (Variance)	0.00	0.00
	Pr(>F)	Pr(>F)
Commune	0.000	0.000
Précédent	0.000	0.000
Traitement	0.000	0.000
Commune: précédent	0.000	0.000
Commune: traitement	0.327	0.000
Précédent: traitement	0.437	0.000
Commune: précédent: traitement	0.003	0.000

Le coefficient de corrélation intra-classe obtenu à partir du modèle vide était de 0% (inférieure à 50%) indiquait un effet non significatif du bloc sur le rendement des deux cultures quelques soit la commune.

L'étude des facteurs simples et de leurs interactions sur le rendement des deux cultures tests indique une différence significative entre les différents facteurs et leurs combinaisons au seuil de 5% (Tableau 8). La commune a un effet très significatif sur les deux cultures traduisant les différences de fertilité des sols entre les quatre zones agroécologiques étudiées. Le précédent cultural représenté par les CCEV a un effet hautement significatif ($p = 0,000$) sur le rendement du maïs et du coton. Le traitement, également, a un effet hautement significatif ($p = 0,000$) sur le rendement des deux cultures. Les combinaisons des facteurs pris deux à deux ont eu

des effets hautement significatifs sur le rendement du coton, alors que sur le maïs seule la combinaison commune : précédent a eu d'effets significatifs (Tableau 8).

Les résultats sur les rendements en grains de maïs et de coton fibre montrent qu'il existe des différences très significatives ($p = 0,003$) pour les effets de la combinaison des trois facteurs sur le rendement du maïs, alors que sur celui du coton on observe une différence hautement significative ($p = 0,000$) au seuil de probabilité de 5 % (Tableau 8).

La rotation CCEV maïs ou CCEV coton a amélioré de façon significative le rendement en grains du maïs et du coton fibre en fonction des traitements et des communes, et donc des sols. La structuration des moyens montre que les rendements grains obtenus sont statistiquement différents. Les rendements obtenus sur parcelles avec CCEV sans complément d'engrais minéral et sur parcelle sans CCEV ayant reçu la dose recommandée ne présentent pas de différences significatives dans les communes de Bantè et de Kandi pour le maïs, tandis que pour le coton la différence observée est significative à Bantè. En ce qui concerne les deux autres communes, on observe des différences très significatives au niveau du maïs et du coton pour la commune de Bembéréké. Les observations faites dans les communes de Zagnanado et de Bembéréké s'expliquent par les faibles teneurs en azote du sol liées aux pratiques culturales. En effet, à Bembéréké, il existe plusieurs modes d'intégration des plantes de couverture dans les systèmes de culture : CCEV en culture pure, CCEV en association et CCEV utilisé pour la parcellisation. Les apports en matières organiques dans le sol sont déterminés par le mode d'intégration choisit par le producteur. Ces résultats montrent un effet bénéfique des CCEV sur le rendement. En effet, l'apport d'engrais vert et les périodes de jachère verte font nettement augmenter le niveau de matière organique et la disponibilité des matières nutritives libérées par la matière organique décomposée dans le sol. Le rendement moyen maïs grain le plus élevé est obtenu dans la commune de Kandi avec de 2 706 kg/ha sur précédent de plante améliorante contre 1 488 kg sur parcelle sans précédent de plantes améliorante (Figure 10). Sur le coton, la rotation plante améliorante coton a amélioré de façon significative le rendement du coton avec un rendement moyen en coton fibre sur parcelle de plantes de couverture plus élevé (1 142 kg/ha) avec apport de la demi dose d'engrais minéral recommandée ; ce rendement est triplé comparé aux parcelles sans plantes de couverture dans la commune de Bantè (Figure 11). Ces résultats corroborent ceux de Ziadi et al. (2006) qui ont montré que la limitation en élément azoté est la principale contrainte de la production des céréales en Afrique sub-Saharienne. Toutefois, il n'est complètement valorisé que si les quantités de P et K disponibles sont suffisantes, d'où la nécessité de la complémentation de la fumure minérale sur les parcelles de CCEV qui se sont soldées par un accroissement de rendement de 700 kg/ha pour le maïs à Kandi et de 2 000 kg pour le coton à Bantè.



© Rolf Sommer/ Alliance of Bioversity International and CIAT

L'apport des engrais minéraux contribue à l'amélioration de la santé des terres et du rendement des cultures, seulement il faut appliquer à temps et à l'endroit approprié la dose requise pour faciliter l'absorption par les plantes. Au Bénin, les doses de 150 kg/ha d'engrais coton NPKSB et 50 kg/ha d'urée sont recommandées par les services de vulgarisation. Ces doses sont relativement faibles et ne tiennent pas compte du niveau actuel de dégradation des sols et des exportations des cultures (Dugué, 2010). Ainsi, Igué et al. (2018) ainsi que Saïdou et al. (2018), simulant avec le modèle DSSAT (Système d'aide à la décision pour l'agrotechnologie, *Decision Support System for Agrotechnology Transfer* en anglais), recommandent des doses $N_{80}P_{30}K_{55}$ au Nord Bénin et $N_{80}P_{30}K_{25}$ au Sud Bénin.

Les CCEV (*Cajanus cajan* et *Mucuna*) sont des légumineuses capables de fournir, grâce à la biomasse laissée respectivement au, sol 40 kg (Van

Der Maesen, 2006) et 100 kg (Vissoh et al. 1998) d'azote par hectare ; en plus, le *Cajanus cajan* peut fixer environ 235 kg/ha d'azote dans les nodules des racines (Peoples et al., 1995). Ces apports par les CCEV dépassent largement les doses d'azote recommandées par Igué et al. (2018) et Saïdou et al. (2018). Cette affirmation traduit la loi de Mitscherlich (1909) à travers la complémentarité entre éléments majeurs. Selon Sileshi et al. (2009), les amendements de doses d'engrais apportées après la jachère augmentent le rendement grain maïs de 25%. Ceci montre que la matière organique issue des légumineuses a un effet synergique avec l'engrais minéral et que les rotations de légumineuse peuvent jouer un grand rôle dans la réduction du besoin de l'engrais minéral.

L'interaction des types de sol (ZAE/commune) et des différentes combinaisons d'engrais minéraux et CCEV a été hautement significative ($P < 0,000$),

et déterminante sur le rendement en grains du maïs ainsi que du coton (Tableau 8). En effet, les rendements ont varié énormément en considérant les différents traitements et les types de sol. La Figure 10 présente l'effet conjugué des différents types de sol et des traitements appliqués sur le rendement grain du maïs. L'analyse des résultats de cette figure a montré qu'à Kandi et Bantè, les rendements de maïs obtenus avec la pratique vulgarisée sont statistiquement équivalents à ceux obtenus sur précédent de plante de couverture sans aucun apport d'engrais minéraux. Les sols ferrugineux tropicaux présentent des rendements en grains de maïs les plus élevés. Ces sols disposent ainsi d'un meilleur pouvoir productif comparé aux sols ferralitiques de Zagnanado. Ce constat serait la conséquence d'une combinaison de situations liées aux pratiques culturales adoptées par les producteurs qui ont influencé les taux de matière organique et d'azote des sols de ces zones (Tableau 7). Plusieurs auteurs ont montré les arrières effets de la fertilisation minérale du cotonnier sur la culture subséquente. Ces arrières effets pourraient

également impacter les CCEV installés. Le fort rendement maïs grain observé sur la culture du maïs dans la commune de Kandi, dont les sols ont de faibles teneurs en matières organiques, pourrait s'expliquer par les semis à bonne date effectués sur le maïs ; tandis que dans la même commune sur le coton, les semis ont été réalisés à l'extrême limite des dates de semis recommandées par la recherche. En effet, Balogoun et al. (2013) ont montré que la période propice pour l'installation du maïs au centre du Bénin est le mois de mai. Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par Varma (2014) qui a démontré l'effet de la période de semis sur la croissance, le développement et le rendement des cultures. Les semis tardifs engendrent des plantes chétives et rabougries à cause du manque d'humidité dans le sol pour faciliter l'assimilation des éléments nutritifs et l'alimentation hydrique de la plante (Asadi & Clemente, 2003). Les semis tardifs coïncident avec la période de grande transpiration par la plante avec des effets négatifs pour la production de grains (Soler et al., 2007).



© Rolf Sommer/ Alliance of Bioversity International and CIAT

4. Modélisation de l'Outil de Durabilité des Systèmes de Culture (CROSST)

4.1 Introduction

La dégradation des sols constitue une menace sérieuse pour la production alimentaire et les moyens de subsistance ruraux en Afrique subsaharienne (Bindraban et al., 2012 ; Obalum et al., 2012 ; Gomiero, 2016). Des pratiques agricoles non-durables ont entraîné une baisse de la fertilité des sols en raison de l'épuisement des nutriments - en particulier des carences en azote (N) et en phosphore (P), de l'érosion éolienne et hydrique, et finalement de la baisse de la productivité agricole (Dessie & Mohammed, 2018).

L'initiative spéciale du BMZ SEWOH s'attaque à certains des plus grands défis auxquels l'humanité est confrontée aujourd'hui. L'objectif de SEWOH est de contribuer de manière significative à l'accroissement de la sécurité alimentaire en réduisant la faim et la pauvreté, en mettant l'accent sur le développement rural et la modernisation de l'agriculture (Mulindabigwi, 2015). SEWOH comprend une gamme de programmes mondiaux mis en œuvre par GIZ dans dix pays. L'un des programmes mondiaux est le programme mondial ProSOL, qui est opérationnel au Bénin, au Burkina Faso, en Éthiopie, au Kenya et en Inde. Il vise à aider les pays partenaires à mettre en œuvre à grande échelle des approches testées sur le terrain pour la conservation des sols et la réhabilitation des sols dégradés. Parallèlement, l'objectif est d'améliorer le cadre décisionnel en vue de mettre en place des incitations à une utilisation durable des sols. Pour soutenir ces activités, le programme soutient l'échange et la diffusion des enseignements tirés des pays partenaires de manière systématique. Les CCEV font partie du portefeuille de technologies promues pour la protection et l'amélioration des sols, en particulier au Kenya et au Bénin.

Les CCEV sont des cultures qui protègent les sols de l'érosion éolienne et hydrique, suppriment les mauvaises herbes, fixent l'azote atmosphérique, les récupèrent, renforcent la structure du sol, réduisent la formation de croûtes à la surface, améliorent l'infiltration d'eau, réduisent la compaction du sol, améliorent sa qualité et éliminent les insectes nuisibles. Les avantages de ces cultures dépendent de la productivité de la biomasse avant que le sol ne soit préparé pour la prochaine culture. Lorsque les cultures de couverture sont enfouies et labourées dans le sol, les engrais verts ajoutés améliorent la fertilité et la structure du sol en nourrissant les populations microbiennes du sol, et collent également les particules du sol pour former des agrégats de sol (Cherr et al., 2006 ; Florentín et al., 2011). Lorsque les microbes du sol décomposent les matières végétales, celles-ci se minéralisent et libèrent de l'azote et d'autres nutriments dans le sol. L'accumulation et la libération d'azote sont plus importantes avec les légumineuses qui contiennent des bactéries qui fixent l'azote dans les racines (Cassman, 2003).

Un cadre et un outil d'évaluation permettant de comparer systématiquement les systèmes de culture existants aux systèmes agro-économiques et environnementaux existants sont nécessaires. La fertilisation, la minéralisation de l'azote et le rendement final des cultures sont tous affectés non seulement par la gestion des cultures individuelles, mais également par les processus à long terme influencés par la séquence des cultures et l'interaction entre les différentes cultures (Baddeley et al., 2017 ; Reckling et al., 2016). En outre, l'intensification durable (ID) est devenue un paradigme important visant à améliorer la productivité tout en garantissant la durabilité de l'environnement. Il faut produire plus de nourriture, de fibres et de fourrages avec moins de ressources - par exemple, en augmentant les rendements par unité de terre, d'eau ou d'engrais (Giller et al., 2011 ; Descheemaeker et al., 2016 ; Falconnier et al., 2017). Pour mieux soutenir les agriculteurs

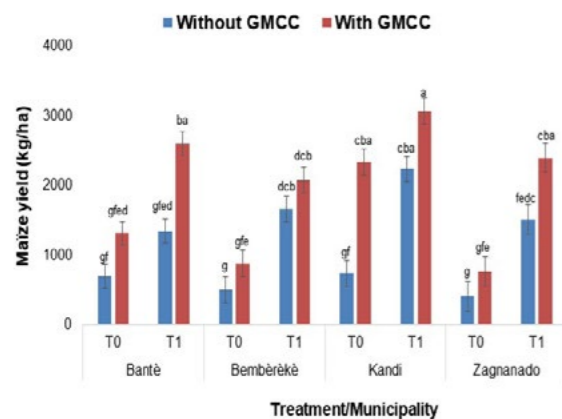


Figure 10: Effets des précédents culturaux et de la pratique paysanne sur le rendement du maïs au centre (Bantè & Zagnanado) et au nord (Bembèrèkè & Kandi) du Bénin.

Notes: T0 without GMCC/-CCEV T0= control positif (sans fertilisant, sans CCEV); T0 with GMCC/+CCEV T0 = Seul précédent CCEV appliqué; T1 without GMCC/-CCEV T1= Pratique paysanne uniquement: (150 kg NPK+50 kg Urée)/ha ; T1 with GMCC/+CCEV T1= moitié dose fertilisant pratique paysanne : (75 kg NPK+25 kg Urée)/ha + précédent CCEV.

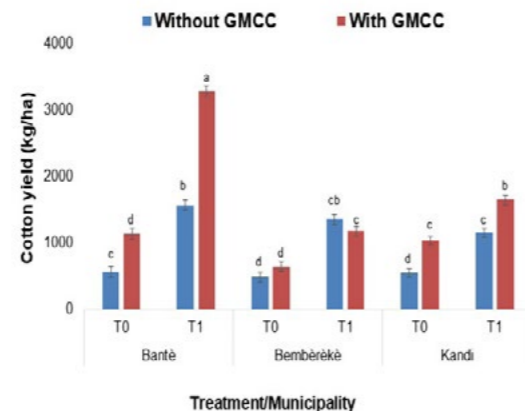


Figure 11: Effet des précédents culturaux et de la pratique paysanne sur le rendement du coton au Centre (Bantè) et au Nord (Bembèrèkè & Kandi) du Bénin.

Notes : T0 without GMCC/-CCEV T0= control positif (sans fertilisant, sans CCEV) ; T0 with GMCC/+CCEV T0 = Seul précédent CCEV appliqué ; T1 without GMCC/-CCEV T1= Pratique paysanne uniquement: (150 kg NPK+50 kg Urée)/ha ; T1 with GMCC/+CCEV T1= moitié dose fertilisant pratique paysanne : (75 kg NPK+25 kg Urée)/ha + précédent CCEV. Les données de Zagnanado ont été occultées car les champs étaient très infestés et l'essai a été enlevé.

et proposer un panier de solutions, il est important de pouvoir analyser les compromis et les synergies agro-environnementaux pour différents systèmes de culture, et de mieux comprendre la manière dont les agriculteurs évaluent les bénéfices, la santé du sol et d'autres facteurs biophysiques et environnementaux (Descheemaeker et al., 2016).

Dans cette étude, nous présentons le CROSST que nous avons développé pour mieux comprendre les impacts agro-environnementaux et socio-économiques ainsi que les compromis de l'intégration des CCEV dans les systèmes de culture. Nous avons appliqué CROSST à certaines zones d'intervention de la GIZ au Kenya et au Bénin pour illustrer ses fonctionnalités avec des résultats pilotes provenant des mêmes zones. À l'avenir, CROSST pourrait être développé et validé pour servir d'outil d'aide à la décision pour le programme de gestion des sols de la GIZ, les partenaires d'exécution et les parties prenantes locales lorsqu'ils envisagent d'intégrer les CCEV aux systèmes de culture.



4.2 Matériel et méthodes

Approche conceptuelle

Lors du développement de CROSST, nous avons adopté les principes du cadre statique développé par Reckling et al. (2016) qui a été appliqué à certains pays d'Europe. Ceux-ci permettent de:

- i** Générer des rotations de cultures (en utilisant les connaissances des experts);
- ii** Sélectionner les paramètres agronomiques, environnementaux et socio-économiques;
- iii** Évaluer et comparer les systèmes de culture avec et sans cultures de couverture et engrais verts.

CROSST s'est en outre inspiré du cadre d'évaluation de l'intensification durable (SAIF) de Musumba, Grabowski, Palm et Snapp (2017). SAIF comprend cinq domaines de durabilité : social, économique, productivité, condition humaine et environnement. CROSST peut évaluer les sept indicateurs suivants relevant des domaines social, économique, de la productivité et de la durabilité environnementale:

Marges brutes	USD/ha	
Main d'oeuvre (h / ha)	Heures de travail h/ha	
Balance d'azote (N)	kg N/ha	
Balance phosphore (P)	kg P/ha	
Rendement 1 (Matière sèche, DM)	kg DM/ha	
Rendement 2	kg DM/ha	
Biomasse 1	kg DM/ha	
Biomasse 2	kg DM/ha	
Matière organique du sol (MOS)/ Structure du sol/	MOS Structure du sol	

Cultures, surfaces, paramètres et collecte de données

Les cultures et les superficies pour chaque pays ont été définies lors d'un atelier d'experts organisé en avril 2018 à Nairobi (Tableau 9). L'un des objectifs de l'atelier était de convenir des cultures et des domaines d'utilisation de l'outil, ainsi que des indicateurs présentant un intérêt pour la recherche (CIAT, 2018c, 2018a, 2018b).

Tableau 9: Zones agro-écologiques et cultures choisies pour le CROSST au Bénin

Pays	Région d'intérêt	Cultures principales	CCEV
Bénin	Nord et sud du Bénin: soudanien 1, soudanien 2, soudano-guinéen sur sols ferrugineux, soudano-guinéen sur les sols ferrallitiques	Coton, maïs, igname	<i>Mucuna</i> , pois d'Angole, niébé

Un paramètre peut être défini comme une caractéristique pouvant aider à définir ou à classer un système particulier (Voinov & Bousquet, 2010). Pour évaluer le système de culture, nous avons décomposé un système en paramètres agronomiques, environnementaux et socio-économiques, qui ont été choisis en fonction des indicateurs d'intérêt (Figure 12).

En ce qui concerne les indicateurs, la marge brute correspond au bénéfice réalisé par l'agriculteur en tenant compte des coûts des intrants tels que les semences, les pesticides, les engrais. Le coût de la main-d'œuvre et le coût de la biomasse ont été fixés à zéro dans cette étude. Un cash-flow positif indique que l'agriculteur réalise des profits tandis qu'une marge négative signifie que l'agriculteur fait des pertes. Les rendements 1/2 et Biomasse 1/2 indiquent que beaucoup de grains et de résidus de culture sont produits, ce qui est un indicateur de la productivité du sol. Pour la balance N/P, un nombre négatif indique que les nutriments N et P sont extraits du sol, et une balance positive indique une accumulation ou un surplus. Pour la MOS (mode d'occupation du sol)/structure de sol, la note rouge représente les effets négatifs et la perte de structure du sol. Le vert signifie qu'il existe un effet positif sur la MOS et la structure du sol.

Tableau 10: Tableaux de données des paramètres et des indicateurs de productivité

Tableaux de données	Paramètres	Numéro d'équation (Annexe 1: Calcul des indicateurs d'impact)	Indicateurs
Informations agro-écologiques	Quantité de pluie (mm/an)	16	N
	Nmin (mg/kg)	16	N
	Sol C g/kg	16	N
	% d'argile	16	N
	Saisons par an	16	N & P
Informations agronomiques	Rendement en grains (fourchettes inférieure et supérieure) kg/ha	1,14	Rendement, biomasse, N, P, marge brute
	Classification agricole (céréales, plantes de couverture, tubercules, fibres, légumineuses, jachères)	30	Rendement, biomasse, N, P, marge brute
	Indice de récolte	2,3	Biomasse
	Concentration N en grain g / 100g	16	N
	Concentration en azote dans les tiges g / 100g	16	N
	Taux de fixation N%	16	N
	P- concentration en grains g / 100g	16	P
	Concentration P dans les tiges g / 100g	28	P
	Score MOS + Classement de la structure du sol	28	MOS

Tableaux de données	Paramètres	Numéro d'équation (Annexe 1: Calcul des indicateurs d'impact)	Indicateurs
Changement de rendement des variations des systèmes de culture	Changement de rendement %	29	Rendement, biomasse, N, P, marge brute
	Changement de rendement du fourrage %	29	Rendement, biomasse, N, P, marge brute
Main d'œuvre	Labeur (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Plantation (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Fertilisation (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Fumier appl. (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Résidus résiduels (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Désherbage (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Pulvérisation de produits chimiques (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Récolte (h/ha)	10	La main d'œuvre
Contributions	Après récolte (h/ha)	10	La main d'œuvre
	Semence 1 (kg/ha)	9	Marge brute
	Semence 2 (kg/ha)	9	Marge brute
	Type d'herbicide	9	Marge brute
	Quantité d'herbicide (litres / ha)	9	Marge brute
	Type de pesticide	9	Marge brute
Prix de revient	Quantité de pesticides (litres/ha)	9	Marge brute
	Les engrais	9	Marge brute
	Teneur en N (%)	16	N
	Prix (\$ / kg)	9	Marge brute
	Teneur en P (%)	16	N

Une combinaison entre les recensements de la littérature, les discussions de groupe, les avis d'experts et la base de données de suivi et d'évaluation de la GIZ a été utilisée pour renseigner les paramètres CROSST (Tableau 10).

Conception et mise en œuvre de CROSST

CROSST a été développé dans une feuille de calcul Microsoft Excel (version 365) en utilisant le code de programmation Visual Basic pour Application (VBA). Le code source utilisé pour construire le modèle peut être trouvé ici. C'est un modèle statique qui capture les effets annuels cumulés de certains systèmes de culture sur trois ans (au bout de six saisons). Le résultat de l'outil est constitué de graphiques à barres, de graphiques de compromis et de scores relatifs. CROSST est composé d'une feuille d'entrée, d'une feuille de sortie et de neuf feuilles de paramètres et de calcul (Figure 12).

Le premier nom de la feuille, *Page de sélection de la CSA* (Agriculture soutenue par la communauté, *Community-Supported Agriculture* en anglais), permet aux utilisateurs de choisir le système de culture qu'ils analysent et de saisir les données nécessaires à leur mise en place.

Le deuxième nom de la feuille, *Sorties*, donne un résumé de tous les résultats.

La troisième feuille jusqu'à la onzième feuille contient les feuilles de paramètres et de calcul. Ce sont des feuilles cachées et ne sont accessibles qu'aux utilisateurs les plus avancés, par exemple pour améliorer les informations relatives à la production agricole dans une région donnée.

4.3 Systèmes de culture

Pour chaque pays et zone, un système conventionnel a été comparé à un système amélioré avec CCEV intégré pour illustrer le fonctionnement de l'outil. Les données ont été recueillies lors d'entretiens avec des experts clé, d'une revue littéraire et de discussions de groupe.

Le Bénin couvre une superficie de 114 763 kilomètres carrés, dont 32,8% sont utilisés pour l'agriculture. Le secteur agricole au Bénin est une source importante de richesse économique puisqu'il contribue à 30% du total du produit intérieur brut (INSAE, 2015). Les principales cultures produites au Bénin comprennent le maïs, le haricot, le riz, les arachides, les noix de cajou, les ananas, le manioc, l'igname, d'autres tubercules, ainsi que des fruits et légumes cultivés pour la subsistance locale et pour la vente. Le coton est la principale culture de rente et est principalement exporté. Les autres cultures exportées comprennent les noix de cajou, les noix de karité et le beurre de karité, les ananas, les produits à base de palme, ainsi que du cacao et du café (FAO, ICRISAT, CIAT et CCAFS, 2018). Le programme GIZ-ProSOL fonctionne actuellement dans quatre zones : Alibori et Borgou au nord et Collines et Zou au sud (Figures 13 et 14). Ces départements ont été choisis en raison du niveau élevé de dégradation des sols (ProSOL, 2016b, Figure 14).

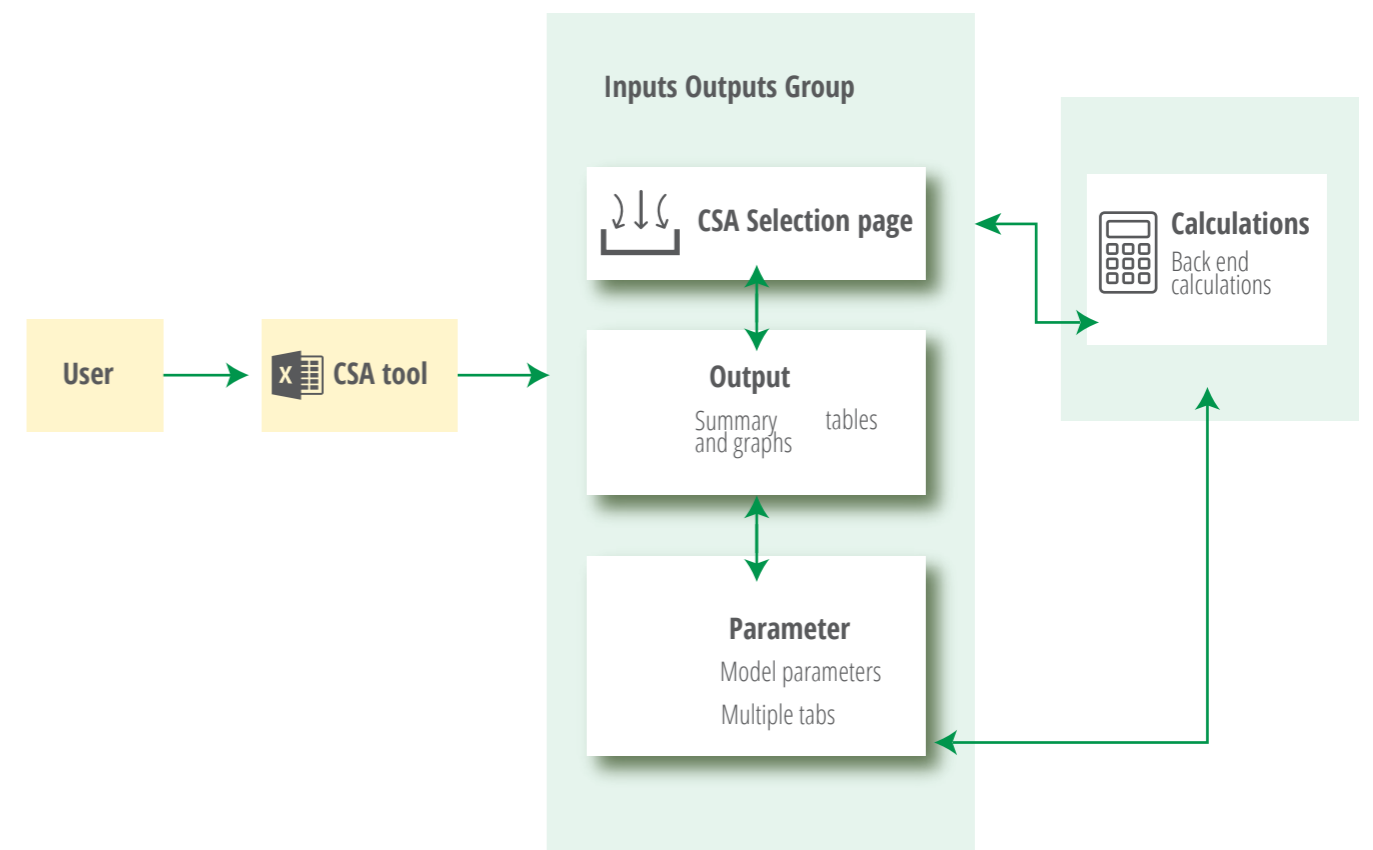


Figure 12: Cadre conceptuel de l'outil de durabilité du système de culture (CROSST).

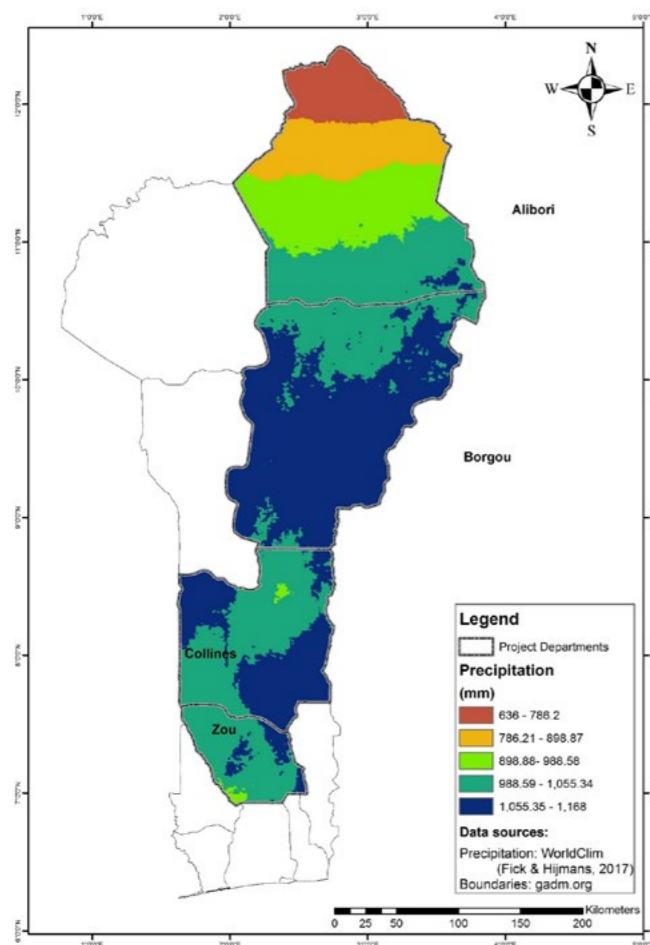


Figure 13: Carte du Bénin montrant les précipitations des régions cibles.

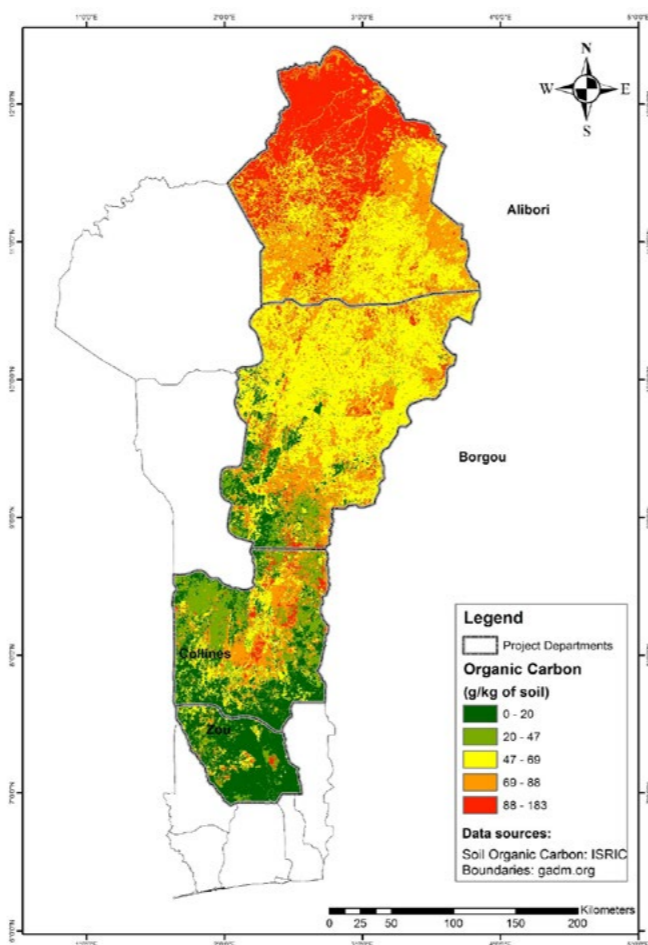


Figure 14: Carte du Bénin montrant le carbone organique des sols des régions cibles.

Alibori

Située au nord du Bénin, cette région a une saison de culture par an avec des précipitations annuelles de 800-1 200 mm. Le système de production est mixte-élevage et la taille moyenne des exploitations est de 5 à 7 ha. Les sols sont tropicaux ferrugineux sur une base cristalline avec une forte proportion de sols lessivés et peu de concrétions. Le coton est une culture de rente importante dans la région (Tableaux 1 et 3, section 2).

Lors des visites de sites et des discussions de groupe avec les agriculteurs de la région, la perte de la fertilité des sols semblait être un problème majeur. La pratique conventionnelle consiste en une monoculture de coton avec rotation du soja (Tableau 11, Figure 15) comprenant la combustion des résidus de récolte et l'application d'engrais minéraux à la dose recommandée de 150 kg d'engrais/ha de NPK (14-23-14). Le marché du coton est bien développé et les agriculteurs reçoivent généralement des intrants tels que des engrais et des semences d'usines. Des déductions de ces intrants ont lieu lorsque les agriculteurs sont payés (CIAT, 2018a). Un aperçu du système de culture est présenté dans le tableau 11.

Table 11 : Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans l'Alibori

Saison	Pratique Conventionnelle	Pratique CCEV
1	Coton	Coton
2	Coton	<i>Mucuna</i>
3	Coton	Coton
4	Soja	<i>Mucuna</i>
5	Coton	Coton
6	Coton	<i>Mucuna</i>



Figure 15 : Monoculture de coton dans l'Alibori au nord Bénin.

Pour le scénario de pratique CCEV, nous n'avons brûlé aucun des résidus de culture ; nous avons également appliqué du NPK (15-15-15) à la culture de coton à un taux de 150 kg/ha. Les résultats de ces scénarios sont représentés dans la section 4.4.1.

Borgou



Figure 16 : Culture Intercalaire maïs-pois d'angole dans le Nord du Bénin

Le Borgou est également situé dans le nord du Bénin, tout comme Alibori. Il n'y a qu'une saison de culture par an et les agriculteurs élèvent à la fois du bétail et produisent des cultures. Dans le Borgou, les précipitations sont plus importantes et varient entre de 900 à 1 300 mm par an (Tableaux 1 et 3, section 2). La taille des fermes et les cultures d'importance sont similaires à celles de l'Alibori. Les sols sont ferrugineux tropicaux avec une grande variabilité et une fertilité moyenne. Ils sont sensibles à l'infiltration. Le maïs est une culture importante pour la consommation alimentaire (Figure 16). La pratique conventionnelle a été définie comme une rotation maïs/coton (Tableau 12) avec brûlage des résidus (Figure 17) et forte application d'engrais de

150 kg/ha pour le coton et de 200 kg pour le maïs par ha. Le système de culture CCEV comprenait des rotations et cultures intercalaires de *Mucuna* et de pois d'Angole sans brûlage des résidus, et le coton uniquement avait reçu d'engrais à raison de 150 kg/ha. Les résultats des différents scénarios sont illustrés dans la section 4.4.2.

Table 12 : Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans le Borgou

Saison	Pratique Conventionnelle	Pratique CCEV
1	Maïs	<i>Mucuna</i>
2	Coton	Coton
3	Maïs	Maïs/Pois d'Angole
4	Coton	Maïs/Pois d'Angole
5	Maïs	Résidu de Pois d'Angole + Coton
6	Coton	Maïs

Collines



Figure 17 : Pratique conventionnelle des paysans au centre/nord du Bénin.

Le département des Collines est situé au centre du Bénin où il n'y a que peu de bétail. La taille moyenne d'une exploitation est de 1,5 ha. Il y a deux saisons des pluies avec des précipitations annuelles de 1 000-1 200 mm. Les sols sont ferrugineux tropicaux sur base cristalline avec une grande variabilité (Tableaux 1 et 3, section 2). Les agriculteurs ont mentionné la destruction des champs par le bétail transhumant comme un défi majeur. L'arachide et le maïs sont des cultures importantes dans ces régions. Tout comme dans le nord, la pratique courante des agriculteurs consiste à brûler les résidus du sol (Figure 17). Les systèmes conventionnels de maïs et d'arachide (Tableau 13) avec application d'engrais minéral de 150 kg par hectare et brûlage des résidus

ont été améliorés grâce à l'intégration du *Mucuna* et de pois d'Angole sans brûlage de résidus, et sans application d'engrais minéraux. Les résultats de ces scénarios sont présentés dans la section 4.4.3

Tableau 13 : Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans les Collines

Saison	Pratique Conventionnelle	Pratique CCEV
1	Maïs	Maïs/ <i>Mucuna</i>
2	Maïs/Arachide	Maïs
3	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
4	Jachère	Jachère
5	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide
6	Maïs	Soja

Zou

Le département du Zou est situé dans le sud du Bénin. Ici, le système de culture est similaire à celui des Collines. Les sols de cette région comprennent des ferralsols rhodiques dégradés, des sols argileux et humifères très profonds et des sols alluviaux très fertiles. Il y a deux saisons de pluies avec des

précipitations annuelles de 800 - 1400 mm. Les cultures les plus importantes sont le maïs, l'igname et le manioc (Tableaux 1 et 3, section 2). Pour cette étude, nous avons fixé le système conventionnel à une culture intercalaire de maïs et d'arachide avec application d'engrais minéraux de 100 kg/ha et brûlage des résidus ; et le système amélioré avec une culture intercalaire de pois d'Angole et un taux de rétention de 100% de résidus sans application d'engrais minéraux (Tableau 14, Figure 18). Les résultats de ces scénarios sont présentés dans la section 4.4.4.

Tableau 14 : Pratique conventionnelle versus pratique CCEV du modèle CROSST dans le Zou

Année	Pratique Conventionnelle	Pratique CCEV
1	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
2	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
3	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
4	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
5	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole
6	Maïs/Arachide	Maïs/Pois d'Angole



Figure 18 : Culture intercalaire maïs - pois d'Angole dans le Sud au Bénin.

4.4 Résultats

La présente section examine les résultats des systèmes de culture décrits à la section 2.4. Les indicateurs ou intérêts sont listés par saison/année, en somme et en moyenne annuelle par hectare (Tableaux 15-22).

Alibori et Borgou et les sites du Nord pour le Bénin n'ont qu'une seule campagne agricole par an et les rendements sont représentés par an. Collines et Zou, dans le sud, ont leurs rendements représentés par saison.

Alibori

Tableau 15 : Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles de l'Alibori

			Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Somme	Moyenne/ha/an
Système de culture conventionnelle			Coton	Coton	Coton	Soja	Coton	Coton		
Soudanienne1	Marge brute	USD/ha	429	342	272	561	517	342	2463	410,5
	Main d'œuvre	h/ha	451	451	451	330	451	451	2585	430,8
	Bilan N	kgN/ha	18	20	20	-10	17	20	86	14,3
	Bilan P	kgP/ha	11	12	12	-8	10	12	48	8,1
	Rendement 1	kgDM/ha	1201	989	819	800	1414	989	6211	1035,2
	Rendement 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	Biomasse 1	kgDM/ha	2439	2008	1663	1104	2870	2008	12091	2015,1
	Biomasse 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
MOS/Structure du sol										

DM=Matière sèche

Tableau 16 : Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV de l'Alibori

			Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Somme	Moyenne/ha/an
Système de culture CCEV			Coton	Mucuna	Coton	Mucuna	Coton	Mucuna		
Soudanienne1	Marge brute	USD/ha	434	251	478	251	478	251	2141	356,9
	Main d'œuvre	h/ha	450	354	450	354	450	354	2412	402,0
	Bilan N	kgN/ha	24	77	23	77	23	77	301	50,1
	Bilan P	kgP/ha	5	-9	5	-9	5	-9	-10	-1,7
	Rendement 1	kgDM/ha	1 212	286	1 319	286	1 319	286	4 707	784,5
	Rendement 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	Biomasse 1	kgDM/ha	2 462	2 607	2 677	2 607	2 677	2 607	15 639	2606,4
	Biomasse 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
MOS/Structure du sol										

DM=Matière sèche

Dans l'Alibori, le système CCEV présente un bilan d'azote supérieur de plus de 70 % à celui de la pratique conventionnelle des agriculteurs et une amélioration substantielle de la structure de la MOS/sol, contrairement à la pratique des agriculteurs. Dans ce cas, l'intégration des CCEV permet d'éviter presque tous les épandages d'engrais minéraux sans compromettre l'état nutritif du sol. Le système agricole conventionnel avait 28 heures de travail de plus que la pratique de CCEV. Cependant, la pratique de l'agriculteur est légèrement plus rentable (13%) car le *Mucuna* n'est pas vendu, mais conservé au sol et remplace une récolte de céréales/fibres (Tableaux 15 et 16).

Borgou

Tableau 17 : Evaluation des pratiques agricoles conventionnelles du Borgou

			Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Somme	Moyenne/ha/an
Système de culture conventionnelle			Maïs	Coton	Maïs	Maïs	Coton	Maïs		
Soudanienne 2	Marge brute	USD/ha	245	563	287	181	563	287	2 127	3 54,4
	Main d'œuvre	h/ha	266	450	266	266	450	266	1 964	3 27,3
	Bilan N	kgN/ha	-16	17	-18	-4	17	-18	-23	-3,8
	Bilan P	kgP/ha	5	10	7	9	10	7	47	7,9
	Rendement 1	kgDM/ha	1 867	1 526	2 249	1 611	1 526	2 249	11 028	1 838,0
	Rendement 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
	Biomasse 1	kgDM/ha	1 723	3 098	2 076	1 487	3 098	2 076	13 558	2 259,7
	Biomasse 2	kgDM/ha	0	0	0	0	0	0	0	0,0
MOS/Structure du sol										

DM= Matière sèche

Tableau 18 : Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV du Borgou

			Année 1	Année 2	Année 3	Année 4	Année 5	Année 6	Somme	Moyenne/ha/an
Système de culture CCEV			<i>Mucuna</i>	Coton	Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole	Coton	Maïs		
Soudanienne2	Marge brute	USD/ha	331	598	324	640	514	264	2 671	445,1
	Main d'œuvre	h/ha	354	450	280	280	376	258	1 998	333,0
	Bilan N	kgN/ha	95	22	-21	101	22	-16	202	33,7
	Bilan P	kgP/ha	-12	9	-5	-13	10	-4	-15	-2,4
	Rendement 1	kgDM/ha	377	1 609	1 947	0	1 406	1 583	6 923	1 153,8
	Rendement 2	kgDM/ha	0	0	0	1 254	0	0	1 254	209,0
	Biomasse 1	kgDM/ha	3 446	3 268	1 797	0	2 855	1 462	12 826	2 137,7
	Biomasse 2	kgDM/ha	0	0	0	4 198	0	0	4 198	699,7
MOS/Structure du sol										

DM= Matière sèche

La pratique des agriculteurs du Borgou a montré des résultats négatifs en termes de fertilité des sols : N est extrait du sol (bilan N négatif) par rotation maïs/coton, même si l'engrais minéral est appliqué. La MOS/structure se détériore sur une période de 6 ans. Dans le cadre de la pratique CCEV d'intégration du *Mucuna* et du pois d'Angole, le bilan de N devient positif et la MOS/structure s'améliore tout en évitant presque toute

application d'engrais minéraux. Ce système CCEV est également plus rentable que celui pratiqué par les agriculteurs, principalement en raison du bon prix des pois d'Angole cultivés en relais. Les heures de travail dans les deux systèmes étaient très similaires avec le système CCEV prenant six heures supplémentaires. Cependant, en raison du marché bien établi du coton et du prêt d'intrants que les agriculteurs reçoivent, cela pourrait les inciter à continuer à cultiver la culture commerciale.

Collines

Tableau 19 : Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles des Collines

			Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison 4	Saison 5	Saison 6	Somme	Moyenne/ha/saison
Système de culture classique			Maïs	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide	Jachère	Maïs/Arachide	Maïs		
Sols Ferrugineux	Marge brute	USD/ha	129	1 216	1 166	0	1 164	163	3 838	639,7
	Main d'œuvre	h/ha	266	374	374	0	322	266	1 602	267,0
	Bilan N	kgN/ha	1	-40	-37	5	-37	-3	-110	-18,3
	Bilan P	kgP/ha	7	-7	-7	0	-7	6	-7	-1,2
	Rendement 1	kgDM/ha	1 111	1 857	1 774	0	1 772	1 306	7 820	1 303,4
	Rendement 2	kgDM/ha	0	1 557	1 498	0	1 497	0	4 552	758,7
	Biomasse 1	kgDM/ha	1 025	1 714	1 638	0	1 636	1 206	7 219	1 203,1
	Biomasse 2	kgDM/ha	0	3 466	3 335	0	3 332	0	10 133	1 688,8
MOS/Structure du sol										

DM= Matière sèche

Tableau 20 : Évaluation des pratiques agricoles améliorées des CCEV des Collines

			Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison 4	Saison 5	Saison 6	Somme	Moyenne/ha/saison
Système de culture CCEV			Maïs/ <i>Mucuna</i>	Maïs	Maïs/Pois d'Angole	Jachère	Maïs/Arachide	Soja		
Sol Ferrugineux	Marge brute	USD/ha	892	122	1 058	0	891	593	3 555	592,4
	Main d'œuvre	h/ha	364	258	364	0	312	330	1 628	271,3
	Bilan N	kgN/ha	-19	-5	89	5	57	41	169	28,2
	Bilan P	kgP/ha	-7	-2	-17	0	-12	-11	-49	-8,2
	Rendement 1	kgDM/ha	1 439	694	1 631	0	1 342	1 126	6 232	1 038,7
	Rendement 2	kgDM/ha	729	0	1 256	0	1 067	0	3 052	508,7
	Biomasse 1	kgDM/ha	1 328	641	1 505	0	1 239	1 555	6 268	1 044,7
	Biomasse 2	kgDM/ha	230	0	4 206	0	2 375	0	6 811	1 135,2
MOS/Structure du sol										

DM= Matière sèche

Dans les Collines, la pratique de l'agriculteur est d'extraire l'azote (N) et la MOS/structure du sol se détériore, mais pas à un rythme rapide en raison de l'arachide qui fait partie de la rotation. Le système de culture des CCEV *Mucuna* et du Pois d'Angole intercalés avec du maïs a permis d'améliorer la santé du sol avec un bilan N positif de 28,2 kgN/ha en moyenne et un meilleur état de la MOS, et de la structure du sol. Le système CCEV a également exigé quatre heures supplémentaires de travail par rapport au système agricole conventionnel. Cependant, la pratique conventionnelle est légèrement plus rentable (50 \$ par saison).

Tableau 21 : Évaluation des pratiques agricoles conventionnelles du Zou

			Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison 4	Saison 5	Saison 6	Somme	Moyenne/ha/saison	
			Maïs/Arachide	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide	Maïs/Arachide			
Système de culture classique	Sols Ferrallitiques	Marge brute	USD/ha	941	961	982	1005	1029	1 053	5 971	995,2
		Main d'œuvre	h/ha	310	310	310	310	310	310	1 860	310,0
		Bilan N	kgN/ha	-24,7	-25,6	-26,5	-27,5	-28,5	-29,5	-162	-27,1
		Bilan P	kgP/ha	-6	-6	-7	-7	-7	-8	-41	-6,8
		Rendement 1	kgDM/ha	1 183	1 206	1 230	1 256	1 283	1 311	7 469	1 244,9
		Rendement 2	kgDM/ha	1 221	1 246	1 272	1 299	1 328	1 359	7 724	1 287,4
		Biomasse 1	kgDM/ha	1 092	1 113	1 136	1 159	1 184	1 210	6 895	1 149,1
		Biomasse 2	kgDM/ha	2 717	2 772	2 831	2 892	2 957	3 024	1 7193	2 865,5
		MOS/Structure du sol									

DM= Matière sèche

Tableau 22 : Évaluation des pratiques agricoles améliorées CCEV du Zou

			Saison 1	Saison 2	Saison 3	Saison 4	Saison 5	Saison 6	Somme	Moyenne/ha/saison	
			Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole	Maïs/Pois d'Angole			
Système de culture CCEV	Sols Ferrallitiques	Marge brute	USD/ha	268	961	371	1207	472	1551	4830	805,0
		Main d'œuvre	h/ha	280	280	228	280	228	280	1576	262,7
		Bilan N	kgN/ha	-13	100	-20	125	-27	159	325	54,1
		Bilan P	kgP/ha	-3	-11	-4	-14	-6	-18	-58	-9,6
		Rendement1	kgDM/ha	1 221	0	1 690	0	2 152	0	5063	843,8
		Rendement2	kgDM/ha	0	1 096	0	1 376	0	1 768	4 240	706,7
		Biomasse1	kgDM/ha	1 127	0	1 560	0	1 986	0	4 673	778,9
		Biomasse2	kgDM/ha	0	3 670	0	4 607	0	5 919	14 196	2 366,0
		MOS/Structure du sol									

DM= Matière sèche

La culture intercalaire consécutive de maïs et de pois d'Angole dans le Zou a des résultats positifs sur la santé du sol par rapport à la culture intercalaire maïs et arachide. L'accumulation de N dans le sol est en moyenne de 54,1 kg N/ha/saison. En ce qui concerne les marges brutes, le système agricole traditionnel est légèrement plus rentable de 20%, le système des CCEV du Zou a exigé moins de 15% de travail que le système conventionnel, mais la marge brute élevée indique un meilleur rendement du travail du système conventionnel. Cependant, cette pratique conventionnelle n'est pas durable, car conserve moins la MOS/structure du sol comparée à la

pratique améliorée qui conserve bien la santé du sol. Un équilibre entre les aspects économique, écologique et social est nécessaire pour assurer une durabilité des systèmes conventionnels de production des zones d'étude.

Équilibrer la Marge Brute contre le Solde en N

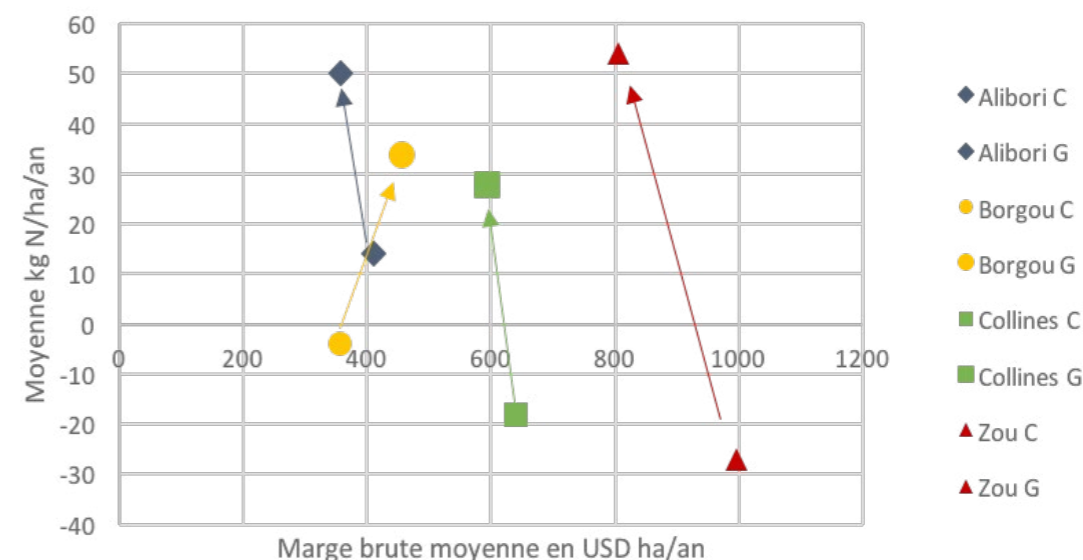


Figure 19 : Marge brute versus bilan de l'azote des systèmes améliorés CCEV dans quatre départements du Bénin.

Dans les régions d'Alibori, du Zou et des Collines, une forte augmentation du bilan N des sols dans le cadre des CCEV s'accompagne d'un léger déséquilibre en termes de marge brute économique. Par contre, dans le Borgou, les CCEV ont conduit à un effet synergique entre la fertilité des sols et les bénéfices obtenus (Figure 19).

4.5 Conclusions de CROSST

Dans cette étude, nous avons présenté le CROSST que nous avons mis au point pour mieux comprendre les impacts agro-environnementaux et socio-économiques et les compromis de l'intégration des CCEV dans les systèmes agricoles. Nous avons appliqué CROSST à certaines zones d'intervention de la GIZ au Bénin pour illustrer ses fonctionnalités avec des résultats pilotes des mêmes zones.

Certaines conclusions peuvent être tirées de l'application pilote du système CROSST :

Dans toutes les régions, les technologies des CCEV permettent d'améliorer considérablement la structure/matière organique du sol ainsi que le bilan en azote (N) du sol. Ceci a également été exprimé dans les groupes de discussion avec les agriculteurs du Bénin qui ont confirmé que la plantation des CCEV s'accompagne de l'obtention de rendements plus élevés.

Cependant, cette amélioration des sols s'est parfois accompagnée d'une perte, légère à modérée rentabilité économique. Ceci apparaît lorsqu'une récolte de céréales qui peut être consommée ou vendue est échangée contre une production de biomasse pour l'amendement du sol. Cela pourrait

faire partie des compromis qui posent des défis à l'adoption des CCEV ou, en d'autres termes, souligne la nécessité d'un investissement économique pour assurer la protection et la réhabilitation des sols. Cela a été confirmé par des groupes de discussion et plusieurs autres études qui signalent que la sécurité alimentaire et le revenu sont les principales priorités des agriculteurs, la fertilité des sols venant au deuxième rang. Ces compromis entre la rentabilité et la demande de main-d'œuvre pourraient constituer des obstacles à l'adoption des CCEV. Cependant, avec la gravité croissante de la dégradation des terres, ces priorités pourraient changer et les agriculteurs prendraient conscience de l'importance d'investir dans la santé des sols. Les agriculteurs béninois étaient conscients des problèmes de dégradation des sols et en attribuaient les causes à la rotation des cultures à l'utilisation de tracteurs et à l'application massive de pesticides et d'engrais minéraux, et cherchent des solutions pour en améliorer les rendements.

Les CCEV à double usage tels que les pois d'Angole et le lablab (dolique) sont souvent les plus populaires auprès des agriculteurs, car ils établissent un équilibre entre la sécurité alimentaire, le revenu et l'amélioration des sols. Les agriculteurs s'efforcent souvent de satisfaire plusieurs objectifs au lieu d'en maximiser un seul.

Les marges économiques des cultures sont souvent plus compliquées que la lecture d'un simple chiffre. Le *Mucuna* et le lablab pourraient être des cultures économiquement intéressantes car les prix officiels du marché pour les haricots et les graines sont élevés, mais les agriculteurs ne trouvent pas toujours des marchés d'écoulement dans leur région. Indépendamment de la marge économique, les cultures comme par exemple le coton offrent l'avantage d'un marché garanti, car la chaîne de valeur est bien organisée. Une autre préoccupation exprimée par les agriculteurs béninois au sujet du *Mucuna* est que le bétail en liberté à la recherche de pâturages ruine leurs champs de *Mucuna*, même s'ils reconnaissent les impacts positifs de la culture sur la fertilité des sols.

Il faut souligner que la ligne de démarcation entre CCEV et non-CCEV n'est toujours pas claire. Des cultures comme le niébé ou le soja sont également considérées par certains comme des cultures CCEV en raison de leur taux élevé de fixation de N, et peuvent également contribuer de manière substantielle à la fertilité des sols. Ils peuvent être renforcés dans les systèmes de production.

Le bilan du phosphore (P) n'est souvent pas directement amélioré par les CCEV et nécessite d'autres améliorations comme l'épandage de fumier ou d'engrais minéraux.

Il est important de noter que les marges brutes étaient les plus élevées dans les régions du sud du Bénin, et quelques fois dans le nord du pays, ce qui est attribué à une campagne agricole par an pour le nord du Bénin. Aussi, les prix des céréales étaient plus élevés dans le sud du Bénin avec des précipitations plus importantes et des rendements plus élevés. Ceci favorise la rentabilité dans les régions du sud du Bénin.

CROSST s'est révélé être un outil prometteur pour comparer la performance socio-économique et agro-environnementale et les compromis entre les différents systèmes de culture. Cependant, comme pour tous les modèles, la qualité des données d'entrée détermine la qualité des sorties. L'obtention des données était un défi pour cette étude, car les informations publiées sont difficiles à recueillir et les données des experts clés difficiles à rassembler dans des délais très courts. Le modèle pourrait être affiné à l'aide de données provenant de recensements officiels récents ainsi que de mesures indépendantes sur le terrain. Pour que les résultats du modèle soient robustes, il faudrait que les parties prenantes procèdent à une validation des résultats et des intrants dans tous les domaines cibles, à des contrôles de sensibilité et de plausibilité, et à des vérifications sur le terrain. Une extension du programme CROSST qui serait nécessaire pour refléter les objectifs du programme comprendrait, par exemple, la santé humaine, c'est-à-dire les avantages pour la santé découlant de l'évitement des pesticides par le biais des CCEV. Si CROSST doit être utilisé par des partenaires non-chercheurs, il faudrait passer d'Excel à une application Web avec une interface facile à utiliser.

Cette étude ne présente que les toutes premières étapes (pilote ou preuve de concept) vers un outil robuste, validé et doté d'un interface facile d'utilisation qui pourrait servir d'outil d'aide à la décision pour le programme pédologique de la GIZ, des universités, les partenaires d'exécution et les acteurs locaux lorsqu'ils envisagent d'intégrer les CCEV dans leurs systèmes de culture ou leur curriculum.



© Rolf Sommer/ Alliance of Bioversity International and CIAT

5. Conclusions et recommandations

Cette étude vise à identifier les Cultures de Couverture et d'Engrais Vert (CCEV) prometteurs et leur intégration dans les systèmes de culture au Bénin.

Dans un premier temps, une revue bibliographique a été réalisée, un profil des systèmes de production intégrant les CCEV a été réalisé et analysé, le niveau de connaissance des producteurs par rapport aux CCEV et les différents modes d'intégration des CCEV dans les systèmes de culture ont été abordés. Les effets des CCEV sur les propriétés physico-chimiques du sol et sur l'amélioration des rendements des cultures de maïs et de coton sont prometteurs et incitent à une vulgarisation rapprochée de ces CCEV pour le bénéfice des producteurs.

Au niveau des connaissances des agriculteurs sur les CCEV, il ressort que plusieurs CCEV ont été introduits, mais deux sont plus connues et utilisées par les agriculteurs pour améliorer la fertilité des sols et contribuer à l'alimentation des animaux en période sèche (*Cajanus cajan* et *Mucuna*). Le *Cajanus cajan* est souvent produit en association avec différentes cultures vivrières, tandis que le *Mucuna* est cultivé en monoculture. Selon les agriculteurs, le *Mucuna* est utilisé pour réveiller le sol lorsqu'il devient improductif. Il existe plusieurs variantes d'association des CCEV avec les cultures.

Dans la commune de Bantè, l'association *Cajanus cajan* avec le maïs dans le même paquet est réalisée le même jour de semis du maïs à la première saison. Ceci permet de laisser la CCEV se développer après la récolte de la culture principale. Dans d'autres communes, le *Cajanus cajan* est utilisé en parcelles ou en association installée après la dernière application de l'herbicide. La pratique de l'herbicide est généralisée à toutes les communes du fait du manque de main d'œuvre agricole pour les travaux d'entretien des parcelles. Au nombre des contraintes abordées par les agriculteurs figurent en bonne place la disponibilité des semences des CCEV.

Les effets des CCEV sur les cultures de maïs et de coton ont montré qu'ils permettent, à eux seuls, d'obtenir des rendements sensiblement égaux à la pratique vulgarisée et que l'apport complémentaire de 50% (de la pratique vulgarisée) d'engrais minéraux permet de tripler les rendements. Ces résultats sont très satisfaisants et méritent d'être développés dans d'autres communautés. De l'estimation des écarts de rendement, il ressort que l'adoption des CCEV permettra d'augmenter le profit des agriculteurs et par conséquent leurs revenus. Ce gain de revenu va induire l'accroissement des dépenses totales des ménages et particulièrement les dépenses de santé et de scolarisation des enfants. Cela va favoriser l'amélioration des conditions de vie des ménages adoptants et par conséquent une réduction de la pauvreté.

Implication des résultats pour la recherche et le développement agricole

Les résultats issus de cette étude confirment le potentiel et le rôle de l'utilisation des CCEV dans l'amélioration de la fertilité des sols et ses retombés potentiels sur le bien-être des ménages. Les CCEV peuvent être utilisées comme un instrument efficace de lutte contre la perte de la fertilité des sols, l'insécurité alimentaire et la pauvreté au Bénin.

L'intégration des CCEV dans les systèmes de culture grâce au ProSOL a permis aux agriculteurs de satisfaire aux besoins alimentaires et non-alimentaires de leurs familles grâce au revenu que cela leur procure sans aucune nuisance sur leur santé et leur environnement immédiat. Elles ont également rayonné dans leur milieu ; ce qui a permis à plusieurs de leurs pairs d'opter pour ces types de culture.

Au terme de cette étude, il ressort que les CCEV sont indispensables à l'amélioration de la fertilité des sols et qu'elles peuvent contribuer à assumer le rôle attendu de tout temps de l'agriculture : assurer la durabilité des systèmes de production, la sécurité alimentaire et nutritionnelle des peuples, etc. Plusieurs producteurs rencontrés ont reconnu et démontré que l'intégration des CCEV peut, si elles sont intégrées dans une politique nationale de développement, devenir un facteur de grande réussite pour l'agriculture familiale. Celle dernière est aujourd'hui pratiquée par environ 60 à 70% des populations actives sur le continent africain. Elle pourrait donc devenir un puissant moyen de développement, si les contraintes qui empêchent aujourd'hui son adoption massive étaient levées. Pour cela, il faut développer avec les agriculteurs plusieurs modes d'intégration des variantes de CCEV et évaluer leurs impacts à court et moyen terme.

La recherche devra travailler à développer des usages alternatifs des CCEV, surtout le *Mucuna* qui n'est pas facilement consommable. Cela nécessite des traitements primordiaux. Aussi, le développement des filières CCEV est indispensable pour la conservation des semences des CCEV dans des banques de semences. Quelques travaux de l'INRAB sont en cours et emboîteront le pas par le biais du *Programme d'Amélioration de la Productivité Agricole des Petits Exploitants* (PAPAPE/SAPEP BENIN).

L'état béninois devra créer le cadre institutionnel et développer des partenariats public-privé dans ce sens pour investir dans la création des banques de semences pour les CCEV. Aussi, il devra accompagner les producteurs qui introduiront des CCEV dans leur système de production par des subventions en intrants.

Références

- Abdulai, A., Owusu, V., & Goetz, R. (2011). Land tenure differences and investment in land improvement measures: Theoretical and empirical analyses. *Journal of Development Economics*, 96(1), 66-78.
- Adégbola, P. Y., Arouna, A., & Ahoyo N. R. A. 2011. Analyse des facteurs affectant l'adoption des greniers améliorés pour le stockage du maïs au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin* : Numéro Spécial, 2, pp. 43-50.
- Adégbola, P. Y., Arouna, A., & Adékambi, S. A. (2016). Impact de l'adoption des variétés améliorées de maïs et de niébé au Bénin. Rapport, PAPA/CRA-Agonkanmey/INRAB/MAEP/Bénin, 68 p.
- Adjanooun, A., Noumavo, P. A., Sikirou, R., Allagbe, M., Gotoechan-Hodonou, H., Dossa, K. K., ... & Baba-Moussa, L. (2012). Effets des rhizobactéries PGPR sur le rendement et les teneurs en macroéléments du maïs sur sol ferrallitique non dégradé au Sud-Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 279-288.
- Agbokou, I., Loconon, D. Z., Houinato, M., Akouewou, G., Dah Megbegnanto Ahouansou, H., & Fassassi, D. 2015. Appui à la gestion durable des espaces cultivés dans les communes bénéficiaires du PANA 1 Rapport d'étude, Cotonou, Bénin.
- Agossou, D. S. M., Tossou, C. R., Vissoh, V. P., & Agbossou, K. E. (2012). Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles béninois. *African Crop Science Journal*, 20, 565-588.
- Agossou, V. (1983). Les sols béninois et leurs potentialités agricoles. Centre National d'Agropédologie (CENAP). *Etude*, 260, 30.
- Akpinfra, E., Assogba, G. C., & Gouwakinnou, G. (2016). Analyse des projets de Gestion Durable des Terres (GDT) au Bénin. *Rapport Final, Bénin*.
- Allagbé, M., Djinadou, K., Bankolé, C., Hinvi, J., Azélokouon, O., Hountondji, A., Adjanooun, A., & Jalloh, A. (2015). Association d maïs et du pois d'angole (*Cajanuscajan*) pour l'amélioration de la fertilité et de l'humidité du sol au Sud-Bénin. Fiche technique INRAB Bénin, 19p. ISBN 978-99919-0-8-73-1. Dépôt légal n° 8277 du 27/11/2015, 4e Trimestre 2015. Bibliothèque Nationale du Bénin.
- Arim, O. J., Waceke, J. W., Waudou, S. W., & Kimenju, J. W. (2006). Effets de *Canavalia ensiformis* et des cultures intercalaires de *Mucuna pruriens* sur *Pratylenchus zeae* et le rendement du maïs en agriculture vivrière. *Plant and Soil*, 284 (1-2), 243-251.
- Asadi, M. E., & Clemente, R. S. (2003). Evaluation of CERES-Maize of DSSAT model to simulate nitrate leaching, yield, and soil moisture content under tropical conditions. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 1, 270-276.

- Assogba, S. C., Akpinfa, E., Gouwakinnou, G., & Stiem, L. (2017). La gestion durable des terres : Analyse d'expériences de projets de développement agricole au Bénin, 32p.
- Ayenon, M. A. T., Ofori, K., Ahoton, L. E., & Danquah, A. (2017). Pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] production system, farmers' preferred traits and implications for variety development and introduction in Benin. *Agriculture & Food Security*, 6(1), 1-11.
- Azontondé, H. A. (1991). Propriétés physiques et hydrauliques des sols au Bénin. *IAHS Publ.*, 199, 253-256.
- Azontondé, A. (2000). Dynamique de la matière organique et de l'azote dans le système *Mucuna* - maïs sur un sol ferrallitique (terre de barre) au sud Bénin. Thèse de doctorat. ENSA, Montpellier, France, p. 241.
- Azontondé, A. H., & Kpagbin, G. (2008). Influence du système mucuna-maïs sur le bilan de l'azote sur un plateau de sols ferrallitiques au Sud-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, Numéro 59 – Mars 2008. Bibliothèque Nationale (BN) du Bénin.
- Baba, C. A. K., Stiem L., & Lanouette, P. (2016). Expériences en gestion durable des terres au Bénin : Quelles leçons tirées pour les orientations futures ? Rapport d'atelier, IASS Working Paper.
- Baddeley, J. A., Pappa, V. A., Pristeri, A., Bergkvist, G., Monti, M., Reckling, M., ... & Watson, C. A. (2017). Legume-based green manure crops. *Legumes in Cropping Systems*, 125-138.
- Balogoun, I., Saïdou, A., Ahoton, L. E., Adjanooun, A., Amadji, G. L., Ezui, G., ... & Sinsin, B. A. (2013). Détermination des formules d'engrais minéraux et des périodes de semis pour une meilleure production du maïs (*Zea mays* L.) au Sud et au Centre Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 1-25.
- Becker, M., Ladha, J. K., & Ali, M. (1995). Technologie des engrais verts : Potentiel, utilisation et limite. Une étude de cas sur le riz de bas-fond. *Plant and Soil*, 174(1-2), 181-194.
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management—a review. *Soil use and management*, 25(4), 335-345.
- Bellwood-Howard, I. R. V. (2014). Perspectives des petits exploitants sur la gestion de la fertilité des sols et les marchés dans la révolution verte africaine. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(6), 660-685.
- Bindraban, P. S., van der Velde, M., Ye, L., van den Berg, M., Materechera, S., Kiba, D. I., ... & van Lynden, G. (2012). Assessing the impact of soil degradation on food production. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(5), 478-488. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.09.015>
- Brabant, P., Darracq, S., Egue, K. & Simonneaux, V., Aing, A., & Auberton Habert, E. (1996). Etat de dégradation des terres résultant des activités humaines = Human-induced land degradation status : notice explicative de la carte au 1 : 500000 des indices de dégradation = Explanatory notes on the land degradation index map. ORSTOM, Paris, 57 p. (Notice Explicative ; 112). ISBN 2-7099-1348-8.

- Callo-Concha, D., Gaiser, T., & Ewert, F. (2012). Systèmes d'agriculture et de culture dans la savane soudanaise d'Afrique de l'Ouest. Domaine de recherche WASCAL : Northern Ghana, Southwest Burkina Faso and Northern Benin, ZEF Working Paper Series, No. 100, Université de Bonn, Center for Development Research (ZEF), Bonn.
- Carsky, R. J., Oyewole, B., & Tian, G. (1999). Integrated soil management for the savanna zone of W. Africa: Legume rotation and fertilizer N. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55(2), 95-105.
- Carsky, R. J., Tarawali, S. A., Becker, M., & Hauser M. S. (2001). *Mucuna* cover crop fallow systems: Potential and limitation. In Tian, G., Ishida, F., & Keatinge, D. (Eds.). *Sustaining Soil Fertility in West Africa*. SSSA Special Publication no. 58, *Soil Science Society of America and American Society of Agronomy*, Madison, WI, USA, pp. 111-135.
- Cassman, K. G. (2003). Nitrogen fixation in tropical cropping systems: Ken E. Giller and Kate J. Wilson. *Field Crops Research*, 34(2), 230-232. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(93\)90012-c](https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90012-c)
- Cherr, C. M., Scholberg, J. M. S., & McSorley, R. (2006). Green manure approaches to crop production: A synthesis. *Agronomy Journal*, 98(2), 302-319. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0035>
- Chianu, J. N., Vanlauwe, B., Mahasi, J. M., Katungi, E., Akech, C., Mairura, F. S., & Sanginga, N. (2008). Situation et perspectives du soja : Le cas du Kenya. TSBF-CIAT, AFNET, 68.
- CIAT. (2018a). Report: Benin-CIAT, ProSOL, SolCA, INRAB, UP. 23-27 July 2018.
- CIAT. (2018b). Report: CIAT scoping mission to ProSOL Benin. 6-7 February 2018.
- CIAT. (2018c). Report: Green Manure Cover Crop, Project Inception, and Planning Workshop. 26-28 March 2018. Nairobi, Kenya.
- Cook, B. G., Pengelly, B. C., Brown, S. D., Donnelly, J. L., Eagles, D. A., Franco, M. A., Hanson, J., Mullen, B.F., Partridge, I.J., Peters, M., Schultze-Kraft, R. (2005). La production de fourrages tropicaux : Un outil de sélection alternatif. <http://www.tropicalforages.info>.
- Coulibaly, K., Koutou, M., Diallo, A. M., & Sangare, M. (2017). Performances agro-économiques de la micro-dose d'engrais sur les cultures associées en zone cotonnière de l'Ouest du Burkina Faso/Agro-economic performance of the micro-dose fertilizer on intercropping in the cotton belt of western Burkina Faso. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 20(1), 170.
- de Haan, L. (Ed.). (1997). *Agriculteurs et éleveurs au Nord-Bénin : écologie et genres de vie*. Karthala Editions, Paris, 217p.
- Descheemaeker, K., Ronner, E., Ollenburger, M., Franke, A. C., Klapwijk, C. J., Falconnier, G. N., ... & Giller, K. E. (2016). Which options fit best? Operationalizing the socio-ecological niche concept. *Experimental Agriculture*, 1-22. <https://doi.org/10.1017/S001447971600048X>
- Dessie, G., & Mohammed, Z. (2018). Sustainable land management for agricultural risk management in Africa. In J. Obiri, M.-F. B. Driver, J. C. Onyekwelu, J. Akpoko, B. Ramasawmy, & A. Dramé-Yayé (Eds.), *Agricultural risk management in Africa: A contextualized manual for tertiary institutions and development practitioners*, 30-47. African Network for Agriculture, Agroforestry and Natural Resources Education (ANAPE), Nairobi, Kenya.
- Diogo, R. V. C., Agandan, E. M. M., Nouatin, G. S., & Djédjé, M. (2017). Modes de gestion de la fertilité des sols des agro-éleveurs peuls au Nord-Ouest du Bénin : Implications pour la sécurité alimentaire. *Annales de l'Université de Parakou, série 'Sciences Naturelles et Agronomie' hors-série n°1*, 74-81. ISSN 1840-8494, eISSN : 1840-8508.
- Diogo, R. V. C., Adodo, P., Nouatin, G. S., & Djédjé, M. (2018b). Analyse du degré d'investissement des producteurs dans la gestion durable des terres au Nord-Est Bénin. In *1er Atelier Scientifique de la Journée Mondiale des Sols de la FSA/UAC*, Abomey Calavi, Bénin, 5-7 décembre 2018, Université d'Abomey Calavi, Bénin, pp. 56-57.
- Diogo, R. V. C., Houédégnon, P., & Djédjé, M. (2018a). Caractérisation de la production cotonnière conventionnelle et amélioration de la durabilité écologique du système de production au Nord du Bénin. *Annales de l'Université de Parakou, Série 'Sciences Naturelles et Agronomie'*, 8(2), 1-14. ISSN 1840-8494, eISSN 1840-8508.
- Dugué, P. (2010). Développement des systèmes de production durables dans les projets vivriers. In *Etude d'évaluation environnementale et du développement de systèmes de production durables dans le cadre des projets de soutien à la production vivrière (Bénin, Togo, Ghana)*. FARM CIRAD, Ghana, 135 p.
- Ehouinsou, M., & Aboh, A. (1998). Adaptabilité de *Aeschynomene histrix* à la production fourragère dans les savanes du nord-Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique*, Numéro 22, 31-42.
- Eilitta, M., Bressani, R., Carew, L. B., Carsky, R. J., Flores, M., & Freteaud, R. (1983). Synthèse des recherches agro climatologiques sur le niébé Bambeby. CNRA, 44p.
- Ewansiha, S. U., Kamara, A. Y., & Onyibe, J. E. (2014). Performance des cultivars de niébé lorsqu'ils sont cultivés comme culture intercalaire avec du maïs de maturités contrastées. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 60(5), 597-608.
- Falconnier, G. N., Descheemaeker, K., Van Mourik, T. A., Adam, M., Sogoba, B., & Giller, K. E. (2017). Co-learning cycles to support the design of innovative farm systems in southern Mali. *European Journal of Agronomy*, 89, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.06.008>
- FAO, ICRISAT, CIAT, & CCAFS. (2018). Climate smart agriculture in Benin. FAO, Rome. <https://cgspace.cgiar.org/handle/10568/97615>
- Fikri, K., Ismaili, M., Fikri, B. S., & Tribak, A. (2004). Problèmes de dégradation de l'environnement par la désertification et la déforestation. Impact du phénomène au Maroc. *Science et changements planétaires. Sécheresse*, 15(4), 307-320.
- Floquet, A. (1998). Evaluation socio-économique en collaboration avec des payans du Bas Bénin d'une gamme de technologies visant à stabiliser le niveau de production des sols. In G. Renard, A. Neef, K. Becker, & M. Von Oppen (Eds.), *Soil Fertility Management in West Land Use Systems. Proceeding of the Regional Workshop in Niamey, Niger*, 4.-8. März 1997. Margraf Verlag, Weikersheim, Germany, pp. 525-530. ISBN 3-8236-1272-7.
- Floquet, A., Maliki, R., & Cakpo, Y. (2006). Sept ans après le SFB 308 – Modèles d'adoption des systèmes agroforestiers au Bénin. Contribution au Tropentag, Bonn, 11 au 13 octobre 2006.
- Floquet, A., Mongbo, R., & Triomphe, B. (2015). L'innovation locale au Bénin – Trajectoires de développement en agriculture sur les trente dernières années. *Agronomie, Environnement & Sociétés*, 5(2), pp. 77-86. ISSN 1775-4240.
- Florentin, M. A., Peñalva, M., Calegari, A., & Derpsch, R. (2011). *Green manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture on small farms: Integrated crop management vol. 12* (M. J. McDonald, Trans.). FAO, Rome.
- Florentin, M. A., Peñalva, M., Calegari, A., & Derpsch, R. (2010). *Les engrais verts et les cultures de couverture et la rotation des cultures dans l'agriculture de conservation dans les petites exploitations agricoles : Integrated crop management vol. 12*. FAO, Rome.
- Fofana, B. (2005). Efficacité de l'utilisation de l'azote par le maïs affecté par une application de *Mucuna* en jachère courte et de P dans la savane côtière de l'Afrique de l'Ouest. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71(3), 227-237.
- Franzluebbers, K., Hossner, L. R., & Juo, A. S. (1998). Integrated nutrient management for sustained crop production in sub-Saharan Africa: A review. Soil Management CRSP, Department of Soil and Crop Sciences, Texas A & M University.
- Gachene, C. K., & Kimaru, G. (Eds.). (2003). *Soil fertility and land productivity: A guide for extension workers in the Eastern Africa Region*. Technical Handbook No. 30. Unité régionale de gestion des terres.
- Gachene, C. K. K., Mbuvi, J. P., Jarvis, N. J., & Linner, H. (1997). Effets de l'érosion du sol sur les propriétés du sol dans une région montagneuse du centre du Kenya. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 559-564. <https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100020027x>
- Gachene, C. K. K., Mureithi, J. G., Anyika, F., & Makau, M. (2000). Incorporation de cultures de couverture d'engrais verts dans un système de culture à base de maïs dans les milieux semi-arides et subhumides du Kenya. In J. Mureithi (Ed.), *Participatory technology development for soil management by smallholders in Kenya. Proceedings of the 2nd Scientific Conference of the Soil Management and Legume Research Network Projects*, pp. 145-151.
- Galiba, M., Vissoh, P., Dagbenonbakin, G., & Fagbahon, F. (1998). Réactions et craintes des paysans liées à l'utilisation du pois mascate (*Mucuna pruriens* var. utilis). In D. Buckles, A. Eteka, O. Osiname, M. Galiba, & G. Galiano (Eds.), *Cover crops in West Africa: Contributing to sustainable agriculture*, pp. 55-65. Centre de recherches pour le développement international (CRDI)/Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA)/Sasakawa-Global 2000, Ottawa, Canada.
- Gbédjissokpa, S. G. M., Diogo, R. V. C., Dossou, J. A. D., Djédjé, M., & Amadji, F. (2018). Etats des lieux des connaissances paysannes des plantes de couverture et engrais verts dans quatre zones agro écologiques du Bénin. In *1er Atelier Scientifique de la Journée Mondiale des Sols de la FSA/UAC*, Abomey Calavi, Bénin, 5-7 décembre 2018, Université d'Abomey Calavi, Bénin, pp.89-90.
- Gentry, L. E., Below, F. E., David, M. B., & Bergerou, J. A. (2001). Source du crédit d'azote du soja dans la production de maïs. *Plant and Soil*, 236(2), 175-184.
- Giller, K. E. (2001). Fixation de l'azote dans les systèmes de culture tropicaux. Cabi.
- Giller, K. E., Tittone, P., Rufino, M. C., van Wijk, M. T., Zingore, S., Mapfumo, P., ... & Vanlauwe, B. (2011). Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural Systems*, 104(2), 191-203. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.07.002>
- Gollin, D., & Rogerson, R. (2014). Productivité, coûts de transport et agriculture de subsistance. *Journal of Development Economics*, 107, 38-48.
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: Reviewing a complex challenge. *Sustainability*, 8(3), 1-41. <https://doi.org/10.3390/su8030281>
- Groot, J. J. R., Hassink, J., & Koné, D. (1998). Dynamique de la matière organique du sol. In *L'intensification agricole au Sahel*, pp. 243-263. Karthala.
- Håkansson, I., & Reeder, R. C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29(2-3), 277-304.
- Hauser, S., Henrot, J., & Hauser, A. (2002). Maize yields in mulched and burned *Mucuna pruriens* var. utilis and *Pueraria phaseoloides* relay fallow systems in southern Cameroon. *Biological Agriculture & Horticulture*, 20(3), 243-256.
- Henao, J., & Baanante, C. (2006). Production agricole et extraction des éléments nutritifs du sol en Afrique : Implications pour la conservation des ressources et l'élaboration de politiques. IFDC Tech, Taureau, Centre international de développement des engrais, Muscle Shoals, AL, USA.
- Honfoga, B. G. (2018). Diagnostic de la dégradation des sols et de la relation entre l'utilisation des engrais et la production durable de coton au Bénin. *Cogent Environmental Science*, 4(1), 1422366.

- Hoorman, J. J. J., & Sundermeier, A. (2009). Utiliser des cultures de couverture pour améliorer la qualité du sol et de l'eau. L'Université d'État de l'Ohio Extension Fact Sheet ANR-57.
- Horst, W., & Härdter, R. (1994). La rotation du maïs avec le niébé améliore le rendement et l'utilisation des éléments nutritifs du maïs par rapport à la monoculture du maïs dans un alfisol dans la savane de Guinée du nord du Ghana. *Plant and Soil*, 160(2), 171-183.
- Houndékon, V., Manyong, V. M., Gogan, C. A., & Versteeg, M. N. (1998). Déterminant de l'adoption de *Mucuna* dans le département du Mono. Cover Crops in West Africa Workshop.
- Houngbo, E. N., Floquet, A., & Sinsin, B. (2012). Poverty and agroforestry adoption: The cases of *mucuna pruriens* and *acacia auriculiformis* in Godohou Village (Southern Benin). *Journal of Life Sciences*, 6(7), 794.
- Hounsou, B. M., Boko, A. S., Badjito, S. P., Alofa, M. V., & Agbossou, K. E. (2020). Incidences socio-économiques et sanitaires de la mise en valeur durable des bas-fonds de la commune de Zagnanado (département du Zou, Bénin). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 14(5), 1786-1799.
- Hulugalle, N. R., & Lal, R. (1986). Root growth of maize in a compacted gravelly tropical alfisol as affected by rotation with a woody perennial. *Field Crops Research*, 13, 33-44.
- Hungria, M., Franchini, J. C., Campo, R. J., Crispino, C. C., Moraes, J. Z., Sibaldelli, R. N., ... & Arihara, J. (2006). Nutrition azotée du soja au Brésil : Contributions de la fixation biologique de N₂ et de l'engrais azoté au rendement en grains. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), 927-939.
- Ido Ebou, J. (2016). Etude de cycle de développement, production de biomasse, qualité fourragère et effet sur la fertilité du sol de quelques légumineuses fourragères. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur en Vulgarisation Agricole, IDR, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, 51 p.
- Igue, A. M., Floquet, A., & Stahr, K. (2000). L'utilisation des terres et les systèmes agricoles au Bénin. In F. Graef, M. von Oppen, & P. Lawrence (Eds.), *Adapted farming in West Africa: Issues, potentials and perspectives*, pp. 227-238. Verlag Ulrich E. Grauer, Stuttgart, Germany.
- Igue, A. M., Saidou, A., Adjanohoun, A., Ezui, G., Attiogbe, P., Kpagbin, G., Gotoechan-Hodonou, H., Youl, S., Pare, T., Balogoun, I., Ouedraogo, J., Dossa, E., Mando, A., & Sogbedji, J. M. (2013). Evaluation de la fertilité des sols au sud et centre du Bénin. *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin (BRAB)*, numéro spécial fertilité du maïs, Janvier 2013.
- Igue, M., Oussou, T.B., Adoko, K.F., Atacolodjou, A., & Salifou, A. (2017). Etat de fertilité des sols et système d'exploitation dans certains villages des communes de Bantè et de Savalou dans le département des collines. Rapport d'activité LSSEE/ INRAB, 6 p.
- Igué, A. M., Balogoun, I., Saidou, A., Oga, A. C., Ezui, G., Youl, S., ... & Sogbedji, J. M. (2018). Recommendations of Fertilizer Formulas for the Production of the EVDT 97 Maize Variety in Northern Benin. In *Improving the Profitability, Sustainability and Efficiency of Nutrients through Site Specific Fertilizer Recommendations in West Africa Agro-Ecosystems* (pp. 105-123). Springer, Cham.
- INRAB (Institut National des Recherches Agricoles du Bénin). (2016). Caractérisation et Évaluation des Milieux Homogènes des Zones Agroécologiques du Bénin. INRAB/Programme Analyse de la Politique Agricole (PAPA). Cotonou, Benin. 307 p.
- INSAE (Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique). (2015). RGPH4 : Que retenir des effectifs de population en 2013 ? DED-INSAE. Accédé le 24/09/19 sur <https://www.insae-bj.org/>. 33p.
- Ivo, A. M. (2008). Les prix des denrées alimentaires et des engrais sont à la hausse en Afrique subsaharienne. Il ne pleut jamais, mais il verse; Cameroun une caricature de l'image plus large. Centre africain pour la communauté et le développement, Bradford.
- Jabbar, M.A. (1993). Evolving crop-livestock farming systems in the humid zone of West Africa. *Outlook on Agriculture*, 22(1), 13-21.
- Jaeltzold, R., & Schmidt, H. (1983). Farm management handbook of Kenya, vol. II: Natural conditions and farm management information. Ministry of Agriculture, Nairobi, Kenya.
- Jasaw, G. S., Bofo, Y. A., & Lolig, V. (2014). Factors Influencing the Adoption of *Mucuna Pruriens* as a Land Conservation Strategy, Evidence from Northern Ghana. *Journal of Science, Technology and Environment*, 4(1), 1-11.
- Jones, R. M., & Bunch, G. A. (2003). Expériences avec les pâturages agricoles à l'ancienne station de recherche du CSIRO à Samford, dans le sud-est du Queensland, et comment ces expériences sont liées aux résultats de 40 ans de recherche. *Tropical Grasslands*, 37, 151-164.
- Kaizzi, C. K., Ssali, H., & Vlek, P. L. (2006). Utilisation différentielle et avantages des haricots velours (*Mucuna pruriens* var. Utilis) et des engrais azotés dans la production de maïs dans des zones agro-écologiques contrastées de l'est de l'Ouganda. *Agricultural Systems*, 88(1), 44-60.
- Kamara, A. Y., Omoigui, L. O., Kamai, N., Ewansiha, S. U., & Ajeigbe, H. A. (2018). Améliorer la culture du niébé en Afrique de l'Ouest.
- Khan, Z. R., Hassanali, A., Overholt, W., Khamis, T. M., Hooper, A. M., Pickett, J. A. ... & Woodcock, C. M. (2002). Lutte contre la sorcière *Striga hermonthica* par culture intercalaire avec *Desmodium spp.* Et mécanisme défini comme allélopathique. *Journal of Chemical Ecology*, 28(9), 1871-1885. <https://doi.org/10.1023/A:1020525521180>
- Klutse, A. R., Bationo, A., & Mando, A. (2018). Déterminants socio-économiques et tendances de l'utilisation des engrais en Afrique de l'Ouest. In A. Bationo, D. Ngaradoum, S. Youl, F. Lompo, & J. O Fening (Eds.), *Improving the profitability, sustainability and efficiency of nutrients through site specific fertilizer recommendations in West Africa agro-ecosystems*, 253-274.
- Kouelo, F. A., Hounnandan, 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 the center of Benin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(6), 2468-2489.
- Lal, R. (2015). Piégeage et agrégation du carbone du sol par culture de couverture. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6), 329-339.
- Laube, W. (2007). Changement des régimes de ressources naturelles dans le nord du Ghana. Acteurs, structure et institutions, Vol. 4. ZEF Development Studies. Lit Verlag Dr. W. Hopf, Münster, Allemagne.
- Leach, M., & Mearns, R. (1992). Poverty and Environment in Developing Countries: An Overview Study. Final Report to the Economic and Social Research Council, Society and Politics Group, Global Environmental Change Initiative Programme, and Overseas Development Administration. Institute of Development Studies at the University of Sussex.
- Lipiec, J., Tarkiewicz, S., & Kossowski, J. (1991). Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research*, 19(2-3), 307-317.
- Madalão, J. C., Souza, M. F. D., Silva, A. A., Silva, D. V., Jakelaitis, A., & Pereira, G. A. M. (2017). Action de *Canavalia ensiformis* dans l'assainissement des sols contaminés par le sulfentrazone. *Bragantia*, AHEAD.
- MAEP (Ministère de l'Agriculture de l'Élevage et de la Pêche). (2015). Rapport de performance du secteur agricole, Gestion 2014. Rapport d'Activité, 92.
- Manyong, V. M., Smith, J., Weber, G. K., Jagtap, S. S., & Oyewole, B. (1996). Macrocaractérisation des systèmes agricoles en Afrique de l'Ouest : Une vue d'ensemble. Resource and Crop Management Research Monograph N° 21. IITA, Nigeria
- Manyong, V. M., Houndekon, V. A., & Gogan, A. C. (1998). Factors affecting the adoption of a short fallow improved technology: The case of *Mucuna* in the southwest of Benin Republic. *International Institute of Tropical Agriculture (IITA), Ibadan, Nigeria*.
- Manyong, V. M., & Houndékon, V. A. (2000). Land tenurial systems and the adoption of *Mucuna* planted fallow in the derived savannas of West Africa (No. 577-2016-39192).
- Maobe, S. M., Kidula, N. L., & Ondicho, A. R. (2000). Effet des pratiques de gestion des résidus d'engrais verts sur le rendement du maïs dans le sud-ouest du Kenya. In J. Mureithi (Ed.), *Participatory technology development for soil management by smallholders in Kenya. Proceedings of the 2nd Scientific Conference of the Soil Management and Legume Research Network Projects, Mombasa, Kenya*, pp. 1-8.
- Mathuva, M. N., Rao, M. R., Smithson, P. C., & Coe, R. (1998). Amélioration des rendements du maïs (*Zea mays*) dans les hauts plateaux semi-arides du Kenya : Agroforesterie ou engrais inorganiques ? *Field Crops Research*, 55(1-2), 57-72.
- McIntire, J., Bourzat, D., & Pingali, P. (1992). Crop-livestock interactions in sub-Saharan Africa. World Bank, Washington DC, pp. 246.
- MDR (Ministère du Développement Rural). (2000). Programme de relance filière arachide, 78p. http://hubrural.org/IMG/pdf/benin_relance_arachide.pdf
- Messerli, P., & Kistler, P. (1999). Innovative strategies of resource users in local knowledge management. A case study of Beforona Region, East Coast of Madagascar. Contribution to the Conference of Knowledge Systems, Solothurn, Switzerland. IKAÖ, University of Berne, Switzerland.
- Midega, C. A. O., Pittchar, J., Salifu, D., Pickett, J. A., & Khan, Z. R. (2013). Effets du paillage, de la fertilisation azotée et de la culture intercalaire avec *Desmodium uncinatum* sur l'infestation de *Striga hermonthica* dans le maïs. *Crop Protection*, 44, 44-49. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.10.018>
- Minot, N., & Daniels, L. (2005). Impact des marchés mondiaux du coton sur la pauvreté rurale au Bénin. *Économie Agricole*, 33(s3), 453-466.
- Mitscherlich, E. A. (1909). Das Gesetz des Minimums und das Gesetz des abnehmenden Bodenertrages. *Landwirtsch. Jahrb.*, 38, 537-552.
- Mrabet, R., Moussadek, R., Fadlaoui, A., & Van Ranst, E. (2012). Conservation agricole in dry areas of Morocco. *Field Crops Research*, 132, 84-94.
- Mugwe, J., Mugendi, D., Mucheru-Muna, M., Odee, D., & Mairura, F. (2009). Effet de matières organiques sélectionnées et d'engrais inorganiques sur la fertilité du sol d'un Nitisol Humique dans les hautes terres du centre du Kenya. *Usage et Gestion des Sols*, 25(4), 434-440.
- Mulindabigwi, V. (2015). Analyse des conditions cadre pour une gestion durable des sols au Bénin. Protection et réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire au Bénin, ProSOL. Bénin, 106.
- Mulindabigwi, V. (2006). Influence des systèmes agraires sur l'utilisation des terroirs, la séquestration du carbone et la sécurité alimentaire dans le bassin versant de l'Ouémé supérieur au Bénin. Ph.D. Thesis, Institut für Gartenbauwissenschaft, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Bonn, Germany.

- Musumba, M., Grabowski, P., Palm, C., & Snapp, S. (2017). Guide for the Sustainable Intensification Assessment Framework. Feed the Future. [https://www.k-state.edu/siil/documents/docs_siframework/Guide for SI Assessment Framework - 10.24.17.pdf](https://www.k-state.edu/siil/documents/docs_siframework/Guide%20for%20SI%20Assessment%20Framework-10.24.17.pdf)
- Nacoulma, J. D., & Guigma, J. B. (2015). Institutional context of soil information in Benin. Consulté : 02/06/2019. <https://pdfs.semanticscholar.org/b408/f0ccb31ae1d4a39b708675ce226b8a4ab620.pdf>. 116p.
- Naitormbaide, M. (2012). Incidence des modes de gestion des fumures et des résidus de récolte sur la productivité des sols dans les savanes du Tchad. Doctoral dissertation, Université de Ouagadougou.
- Ndakidemi, P. A. (2006). Manipulation de mélanges légumineuses/céréales pour optimiser les interactions de surface et souterraines dans les systèmes de culture traditionnels africains. *African Journal of Biotechnology*, 5 (25).
- N'Guessan, K. A., Diarrassouba, N., Alui, K. A., Nangha, K. Y., Fofana, I. J., & Yao-Kouame, A. (2015). Indicateurs de dégradation physique des sols dans le Nord de la Côte d'Ivoire : cas de Boundiali et Ferkessédougou. *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 11(3), 115-128.
- Nimmo, J. R., Rubin, J., & Hammermeister, D. P. (1987). Unsaturated flow in a centrifugal field: Measurement of hydraulic conductivity and testing of Darcy's law. *Water Resources Research*, 23(1), 124-134.
- Obalum, S. E., Buri, M. M., Nwite, J. C., Hermansah, Watanabe, Y., Igwe, C. A., & Wakatsuki, T. (2012). Soil degradation-induced decline in productivity of sub-saharan african soils: The prospects of looking downwards the lowlands with the sawah ecotechnology. *Applied and Environmental Soil Science*, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/673926>
- Odion, E. C., Asiribo, O. E., Ogunlela, V. B., Singh, B. B., & Tarawali, S. A. (2007). Strategies to improve and sustain food production capacity in the savanna: The role of leguminous fodder crops in maintaining soil fertility and health. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 5(2), 338.
- Ojiem, J. O., Vanlauwe, B., De Ridder, N., & Giller, K. E. (2007). Évaluation de la contribution des légumineuses à l'économie de l'azote des petites exploitations agricoles de l'ouest du Kenya, sur la base d'une niche. *Plant and Soil*, 292(1-2), 119-135. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9207-7>
- Okoko, E. N. K., Rees, D. J., Kwach, J. K., & Ochieng, P. (1999). Évaluation participative des productions d'arachide dans le sud-ouest du Kenya. In *Towards increased use of demand-driven technology*, KARI/DFID NARP II PROJECT, conférence de fin de projet du 23 au 26 mars 1999, Nairobi Kenya. pp 305-307.
- Olson, K., Ebelhar, S. A., & Lang, J. M. (2014). Effets à long terme des cultures de couverture sur le rendement des cultures, les stocks de carbone organique du sol et la séquestration. *Open Journal of Soil Science*, 4(08), 284.
- Olufajo, O. O., & Singh, B. B. (2002). Progrès dans la recherche sur les systèmes de culture du niébé. In C. A. Fatokun, S. A. Tarawah, B. B. Singh, P. M. Koemawa, & M. Tawa (Eds.), *Challenges and opportunities for enhancing sustainable cowpea production*, IITA, Ibadan, pp. 267-277.
- Parker, E. C. (1920). Gestion des champs et rotation des cultures. Webb Publishing Co., Minnesota.
- Pazhamala, L., Saxena, R. K., Singh, V. K., Sameerkumar, C. V., Kumar, V., Sinha, P., ... & Varshney, R. K. (2015). Genomics-assisted breeding for boosting crop improvement in pigeonpea (*Cajanus cajan*). *Frontiers in Plant Science*, 6, 50.
- Peoples, M. B., Herridge, D. F., & Ladha, J. K. (1995). Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? In *Management of biological nitrogen fixation for the development of more productive and sustainable agricultural systems*, pp. 3-28. Springer, Dordrecht.
- Pieri, C. 1989. Fertilité de terres de savane. Bilan de trente ans de recherché et de developpment agricoles au sud du Sahara. Ministère de la Cooperation. CIRAD, Paris, France, 444 p.
- Pieters, A. J., & McKee, R. (1938). L'utilisation de cultures de couverture et d'engrais verts. *Soils and Men, the Yearbook of Agriculture*. USDA. Gouvernement des États-Unis Imprimer, Washington, DC, 431-444.
- ProSOL-GIZ (Protection et réhabilitation des sols pour améliorer la sécurité alimentaire au Bénin). (2015). Analyse des conditions cadres pour une gestion durable des sols au Bénin, pp. 106.
- ProSOL (Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité Alimentaire). (2016a). Propositions pour une meilleure intégration de l'agriculture et de l'élevage pour une gestion durable des terres dans l'Alibori au Bénin. Rapport d'enquête, 64p.
- ProSOL (Protection et Réhabilitation des Sols pour améliorer la Sécurité Alimentaire). (2016b). Fertilité des sols au Bénin. Coopération GIZ-MAEP-INRAB, Document abrégé, Cotonou, Bénin, 6 p.
- Reckling, M., Bergkvist, G., Watson, C. A., Stoddard, F. L., Zander, P. M., Walker, R. L., ... & Bachinger, J. (2016). Trade-offs between economic and environmental impacts of introducing legumes into cropping systems. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00669>.
- Reeves, D. W. (1994). Cultures de couverture et rotations. In J. L. Hatfield & B. A. Stewart (Eds.), *Progrès en science du sol : Gestion des résidus de culture*, Lewis Publishers, Boca Raton, 125-172.
- Roose, E. (2015). Influences du climat et du couvert végétal sur les pertes en nutriments par érosion et drainage en Afrique occidentale. *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens Contribution à l'agroécologie*, 24.
- Saïdou, A., Balogoun, I., Ahoton, E. L., Igué, A. M., Youl, S., Ezui, G., & Mando, A. (2018). Les recommandations d'engrais pour la production de maïs au Sud Soudan et dans les zones soudano-guinéennes du Bénin. In A. Bationo, D. Ngaradoum, S. Youl, F. Lompo, & J. O. Fening (Eds.), *Improving the profitability, sustainability and efficiency of nutrients through site specific fertilizer recommendations in West Africa agro-ecosystems*, pp. 215-234.
- Saïdou, A., Kossou, D., Acakpo, C., Richards, P., & Kuyper, T. W. (2012). Effets des pratiques des agriculteurs en matière d'épandage d'engrais et d'utilisation des terres sur le rendement ultérieur du maïs et l'absorption des éléments nutritifs dans le centre du Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6(1), 365-378.
- Saïdou, A., Janssen, B. H., & Temminghoff, E. J. M. (2003). Effets des propriétés du sol, du paillis et des engrais NPK sur les rendements en maïs et les bilans nutritifs des sols ferrallitiques du sud du Bénin. *Agriculture, Écosystèmes et Environnement*, 100, 265-273.
- Saïdou, A., Tossou, R. C., Kossou, D., Sambieni, S., Richards, P., & Kuyper, T. W. (2007). Régime foncier et gestion durable de la fertilité des sols au centre du Bénin : Vers la mise en place d'un espace de coopération entre les acteurs. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 5(2-3), 195-212.
- Salako, F. K., & Tian, G. (2003). L'épuisement de l'eau du sol sous diverses cultures de couverture légumineuses dans la savane dérivée de l'Afrique de l'Ouest. *Agriculture, Écosystèmes et Environnement*, 100(2), 173-180.
- Sanchez, P. A., & Jama, B. A. (2002). Soil fertility replenishment takes off in East and Southern Africa. *Integrated plant nutrient management in sub-Saharan Africa: From concept to practice*, CABI, Wallingford, UK, 23-46.
- Sanginga, N., Okogun, A., Akobundu, I. O., Carsky, R. J., Tian, G., & Wirkom, L. E. (1996). Nodulation et estimation de la fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses herbacées et arbustives dans la savane de Guinée au Nigeria. *Biology and Fertility of Soils*, 23(4), 441-448.
- Schmidt, C. P., Belford, R. K., & Tennant, D. (1994). Effect of different direct drilling and conventional sowing techniques on soil strength, root growth and grain yield of wheat on sandplain soils in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*, 45(3), 547-564.
- Schulz, S., Carsky, R. J., & Tarawali, S. A. (2001). Herbaceous legumes: The panacea for West African soil fertility problems? *Sustaining Soil Fertility in West Africa*, 58, 179-196.
- Séguy, L., & Bouzinac, S. (2001). Cropping systems and organic matter dynamics. 5 p. In *World Congress on Conservation Agriculture, Madrid, 1-5 October 2001*.
- Sileshi, G., Akinnifesi, F. K., Ajayi, O. C., & Place, F. (2009). Evidence for impact of green fertilizers on maize production in sub-Saharan Africa: A meta-analysis. ICRAF Occasional Paper 10.
- Sinsin, B., Matig, O. E., Assogbadjo, A. E., Gaoué, O. G., & Sinadouwirou, T. (2004). Caractéristiques dendrométriques comme indicateurs de pression d'*Azelia africana* Sm. Changements dynamiques des arbres trouvés dans différentes zones climatiques du Bénin. *Biodiversity & Conservation*, 13(8), 1555-1570.
- Smaling, E. M. A., Roscoe, R., Lesschen, J. P., Bouwman, A. F., & Comunello, E. (2008). De la forêt aux déchets : Évaluation de la chaîne du soja brésilien, en utilisant l'azote comme marqueur. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128, 185-197.
- Sogbedji, J. M., van Es, H. M., & Agbeko, K. L. (2006). Cover cropping and nutrient management strategies for maize production in Africa. *Agronomy Journal*, 98(4), 883-889.
- Sokpoh, G. (1997). Impact de la dévaluation du franc CFA sur l'utilisation des engrais minéraux et nouvelles stratégies de fertilisation des sols au Togo, Mémoire d'Ingénieur Agronome, UB-ESA, Lomé, 93 p.
- Soler, C. M. T., Sentelhas, P. C., & Hoogenboom, G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. *European Journal of Agronomy*, 27(2-4), 165-177.
- Soti, P. G., Rugg, S., & Racelis, A. (2016). Potentiel des cultures de couverture pour promouvoir la diversité mycorhizienne et la qualité du sol dans les fermes biologiques. *Journal of Agricultural Science*, 8(8), 42.
- Tarawali, S., Amadji, F., & Ahouanton, K. (1999). *Mucuna* pour une amélioration durable de la fertilité du sol et des rendements au centre et au Sud du Bénin. BMZ-GTZ/ILR/IITA/INRAB-PULH AFD-PADSE.
- R Core Team. (2018). R version 3.5.0. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Triberti, L., Natri, A., & Baldoni, G. (2016). Effets à long terme de la rotation des cultures, du fumier et de la fertilisation minérale sur la séquestration du carbone et la fertilité des sols. *European Journal of Agronomy*, 74, 47-55.
- Tsigbey, F. K., Brandenburg, R. L., & Clotvey, V. A. (2003). Méthodes de production d'arachides dans le nord du Ghana et quelques perspectives de maladies. World Geography of the Peanut Knowledge Base Website.
- UN. (2007). UN Millenium Development Goals. United Nations, New York.
- Van der Maesen, L. J. G. (2006) *Cajanus Cajan* (L.) Millsp. In *Plant Resources of Tropical Africa 1: Cereals and pulses*. Backhuys, Leiden, Netherlands, pp. 35-40. ISBN 9057821702.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.

- Vanlauwe, B., Bationo, A., Carsky, R. J., Diels, J., Sanginga, N., & Schulz, S. (2003). Renforcer la contribution des légumineuses et la fixation biologique de l'azote dans les systèmes de culture : Expériences de l'Afrique de l'Ouest. In S. R. Waddington (Ed.), *Grain legumes and green manures for soil fertility in Southern Africa: Taking stock of progress*, Soil Fertility and Policy Network for Maize-based Cropping Systems in Southern Africa, Harare, Zimbabwe, 3-13.
- Varma, V. S., Durga, K. K., & Neelima, P. (2014). Effect of sowing date on maize seed yield and quality: A review. *Review of Plant Studies*, 1(2), 26-38.
- Vendryes, T. (2014). Transitions démographique et économique en République populaire de Chine : Héritage socialiste, population et croissance. In V. Sauvat (Ed.), *Les exclusions paysannes: Quels impacts sur le marché international du travail?* AFD, Paris.
- Versteeg, M. N., & Koudokpon, V. (1993). Mise à l'essai participative par les agriculteurs de quatre technologies à faibles intrants externes pour faire face au déclin de la fertilité des sols dans le département du Mono (Bénin). *Agricultural Systems*, 42(3), 265-276.
- Viennot, M. (1978). Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuille de Bembèrèkè. ORSTOM, Paris, 45p.
- Vissoh, P. V. (2006). Développement participatif des technologies de lutte contre les mauvaises herbes au Bénin.
- Vissoh, P., Manyang, V. M., Carsky, J. R., Osei-Bonsu, P., & Galiba, M. (1998). Experience with *Mucuna* in West Africa. In D. Buckles, A. Etèka, O. Osiname, M. Galiba, & G. Galiano (Eds.), *Cover crops in West Africa: Contributing to sustainable agriculture*, pp. 1-32. National Library of Canada. ISBN 0-88936-852-X.
- Vodounon, H. S. T., Djohy, G. L., Amoussou, E., & Boko, M. (2016). Instabilité du régime climatique et dynamique des systèmes pastoraux dans la commune de Sinende au Nord-Bénin. *Revue des Sciences de l'Environnement*, 13, 157-178.
- Voinov, A., & Bousquet, F. (2010). Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling and Software*, 25(11), 1268-1281. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>
- Vukicevich, E., Lowery, T., Bowen, P., Úrbez-Torres, J. R., & Hart, M. (2016). Cultures de couverture pour accroître la diversité microbienne du sol et atténuer le déclin de l'agriculture pérenne. Une critique. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 48.
- Weber, G. (1996). Technologies à base de légumineuses pour les savanes africaines : Défis pour la recherche et le développement. *Biological Agriculture & Horticulture*, 13(4), 309-333.
- Wennink, B., Dagbenonbakin, G., & Agossou, V. (1999). Cotton farming in northern Benin and mixed farming in southern Benin. In A. Budelman & T. Defoer (Eds.), *PLAR and Resource Flow Analysis in Practice: Case Studies from Benin, Ethiopia, Kenya, Mali and Tanzania*. Part 2. Royal Tropical Institute (KIT), Amsterdam, pp. 143-192.
- Wu, N., Fu, K., Fu, Y. J., Zu, Y. G., Chang, F. R., Chen, Y. H., ... & Gu, C.-B. (2009). Antioxidant activities of extracts and main components of pigeonpea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.] leaves. *Molecules*, 14, 1032-1043.
- Yao, S. A. (2015). Recommandations spécifiques d'engrais pour la fertilisation de l'arachide. Mémoire d'Ingénieur du Développement Rural, Institut de Développement Rural, Université Polytechnique de Bobo Dioulasso, 46p. http://bibliovirtuelle.u-naziboni.bf/biblio/opac_css/docnume/idr/environnement/IDR-2015-YAO-REC.pdf
- Zhang, R. (1997). Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1024-1030.
- Ziadi, N., Gagnon, B., Rochette, P., Angers, D., & Chantigny, M. (2006). Nitrogen use efficiency and N₂O emission reduction in corn receiving mineral fertilizers. Rapport de projet, 12 p.
- Ziervogel, G., Nyong, A., Osman, B., Conde, C., Cortes, S., & Dowing, T. (2006). Variabilité et changement climatiques : Implications pour la sécurité alimentaire des ménages. Évaluations des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques (AIACC), document de travail no 20, janvier 2006. The AIACC Project Office, International START Secretariat, Washington DC, USA.

Alliance



RESEARCH
PROGRAM ON
Livestock



Science for a food-secure future

Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT) are part of CGIAR, a global research partnership for a food-secure future.

Bioversity International is the operating name of the International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI)

Africa Hub
c/o icipe (International Centre of Insect Physiology and Ecology)
Duduville Campus Off Kasarani Road
P.O. Box 823-00621
Nairobi, Kenya

<https://alliancebioversityciat.org>
www.cgiar.org