



Restauration agro-écologique des terres dénudées « zipellés » par la technique traditionnelle du zaï forestier au Yatenga, Burkina Faso

DOAMBA S.W.M.F¹., HIEN, E^{2,3}., Lepage, M³., 2024.

¹Université de Fada N'Gourma, Institut Supérieur du Développement Durable (ISDD), BP 54 Fada N'Gourma, Burkina Faso

²Université Joseph Ki-Zerbo (UJKZ), UFR Sciences de la Vie et de la Terre, 03 BP 7021 Ouagadougou, Burkina Faso

³Institut de Recherche pour le Développement (IRD), 01 BP 182, Ouagadougou 01, Burkina Faso

ABSTRACT

Le zaï forestier est une technique de restauration agro-écologique des sols. Cette technique issue du zaï agricole permet la revégétalisation des espaces dégradés et souvent complètement dénudés appelés « zipellés » en langue locale « mooré ». Les objectifs de cette étude ont consisté à caractériser les évolutions biologiques de parcelles de zaï forestier d'âges différents (14, 21, 24 et 30 ans). L'étude a été effectuée à Gourga dans la province du Yatenga (Burkina Faso). La collecte des données a été conduite sur deux transects traversant des parcelles de zaï d'âges différents. Un suivi de la diversité spécifique des ligneux et herbacées, de la densité ligneuse, des activités microbiennes du sol ont été effectués. Les résultats révèlent une amélioration de la diversité floristique dans les parcelles de zaï. Les familles les plus représentées sont les Combretaceae (49,28%), les Caesalpiniaceae (27,9%) et les Mimosaceae (6,52%). Concernant les herbacées, les plus représentées sont les suivantes : les Poaceae (26,4%), les Fabaceae (21,7%) et les Rubiaceae (20,5%). La biomasse herbacée se situe autour de 0,4t/ha dans les zaï de 20 et 21 ans et autour de 0,3 t/ha dans les zaï de 24 ans et 30 ans. La densité ligneuse variait entre 2632 à 4848 individus/ha et la plus faible densité observée dans le zaï de 30 ans qui a connu un passage accidentel des feux au cours de son évolution. Au niveau des sols, la biomasse microbienne quant à elle variait de 46,1 à 101µg C/g sol. Différents facteurs inter-reliés participent à l'installation de la diversité et de l'hétérogénéité biologique du système zaï forestier.

Mots clés: zaï forestier, restauration agro-écologique, Yatenga, Burkina Faso

Received 25 July, 2024; Revised 31 July, 2024; Accepted 05 Aug., 2024 © The author(s) 2024.

Published with open access at www.questjournals.org

I. INTRODUCTION

L'érosion des sols par l'eau et le vent est un sérieux problème environnemental en Afrique [1]. Cela est à l'origine de phénomènes de dégradation souvent très accentués des terres qui limitent leurs productions. Globalement, près de deux millions d'hectares de terres sont affectés par les actions anthropiques de dégradation du sol [2]. Cette dégradation entraîne une baisse de la fertilité chimique, physique et biologique des sols et une perturbation de l'équilibre des écosystèmes naturels et agricoles [3]. Ce qui constitue une menace pour la sécurité alimentaire à moyen et à long terme. Statistiquement, 27% du total de la superficie des terres du continent africain sont dégradées avec 65% qui sont des terres agricoles [4]. Le phénomène de perte de biodiversité est aussi observé au Burkina Faso et plus particulièrement dans sa partie Nord. Une étude précédente a montré en effet, qu'environ 24% des terres arables sont fortement dégradées et que 31% de la pluviosité annuelle est perdue par ruissellement [5]. Cette situation se traduit par une dégradation continue des terres par suite de la surexploitation du sol et de la disparition progressive du couvert végétal, entraînant la formation de glaciis dénudés et dégradés appelés « zipellés » en langue locale moré [6]. Les terres dénudées ont pris une proportion inquiétante dans le Yatenga et différentes méthodes de conservation des eaux et des sols et de défense et restauration des sols (CES/DRS) ont été proposées, principalement à partir des années 1980 pour lutter contre cette dégradation [4]. Ces méthodes ont connu des succès mitigés, obligeant les techniciens et chercheurs à étudier et à améliorer certaines techniques traditionnelles comme le zaï. Cette technique

traditionnelle de récupération des sols est une forme particulière de culture en poquets concentrant les eaux de ruissellement dans des micro-bassins. Dans la pratique du zaï, les agriculteurs creusent des fosses (micro-bassins) en rangées parallèles peu avant les premières pluies, ils mettent des semences de cultures et du compost séché dans les cuvettes. Chaque agriculteur adapte les fosses aux conditions de son exploitation (nombre de fosses, dimensions, quantité de compost) [7]. Certains utilisent le zaï pour intensifier la production céréalière, d'autres pour le reboisement ou les deux [5]. La matière organique attire les termites qui construisent des galeries dans le sol et fragilise la croûte.

Des travaux antérieurs ont montré que la superficie totale couverte par le zaï atteint 30 000 à 60 000 ha dans le nord-Ouest du Burkina Faso et plus de 200 000 ha de terres agricoles dans le centre du Burkina Faso [5, 8, 9]. Une étude dans le nord du Burkina Faso a indiqué une augmentation de plus de 100% des rendements des cultures de sorgho, de mil et de maïs dans les exploitations où la pratique du zaï a été mise en œuvre [10]. Les rendements agricoles peuvent être améliorés de 0,3 à 0,4 t/ha dans les années de précipitations minimales d'environ 560 mm, et jusqu'à 1,5 t/ha dans les années de précipitations plus élevées d'environ 650 mm [11]. Par ailleurs de la pratique du zaï agricole, l'exploitation peut évoluer vers le zaï forestier. La multiplication des essences ligneuses serait possible à partir des semences contenues dans le fumier utilisé dans les poquets de zaï ou apportées par le vent ou l'eau de ruissellement [1]. Une sélection s'effectue dès les premières années au cours des opérations de sarclage. Le champ peut être abandonné en jachère au bout d'une certaine durée d'exploitation si le nombre d'espèces volontairement retenues devient important. La technique du zaï permet en effet, de restaurer la fertilité des sols et d'installer un espace agro-sylvo-pastoral intégré, permettant aux populations locales d'en tirer des bénéfices à court, moyen et long termes [12]. Alors que l'efficacité du zaï agricole a été étudiée par de nombreux auteurs [11, 13-15], le zaï forestier a fait l'objet de beaucoup moins d'attention. Pourtant, cette technique qui est fondée sur un système d'ingénierie agro-écologique de la gestion durable des terres mérite bien une attention particulière de la part de la recherche. C'est ce qui justifie notre présente étude dont l'objectif global était de caractériser les évolutions chimiques et biologiques (couvert végétal, paramètres chimiques et biologiques du sol) de parcelles d'âges différents de zaï forestier (14, 21, 24 et 30 ans). Cette étude répond donc à trois hypothèses de recherches (i) la diversité biologique varie en fonction de la durée de mise en œuvre de la technique; (ii) la diversité épigée évolue en fonction de la diversité souterraine; (iii) l'hétérogénéité de l'écosystème, à différentes échelles, constitue le moteur principal de la productivité végétale de ces sols réhabilités.

II. MATERIEL ET METHODES

Les travaux de terrain se sont déroulés dans les parcelles de zaï forestier (13° 32' 27''N; 2°22'57' O, altitude 336m) à Gourga (province du Yatenga) dans la zone sub-sahélienne au Burkina Faso (Figure 1). Le climat est caractérisé par une saison pluvieuse de quatre (4) à cinq (5) mois et une longue saison sèche avec des températures élevées [16]. Sur le plan pluviométrique, les précipitations sont peu abondantes et irrégulières dans le temps et dans l'espace. De 1921 à 2004, les hauteurs d'eau annuelles ont varié entre 400 et moins de 900 mm. Les années 1980 se sont montrées catastrophiques avec des pluviosités en deçà de 500mm. Entre 1998 à 2008, la pluviométrie annuelle moyenne était d'environ 660mm, la température moyenne annuelle variait entre 19,1°C et 39,1°C. Les amplitudes thermiques sont aussi très variables et les températures maximales atteignent 45°C en avril et les minimales 15°C en février [17]. La végétation de la zone d'étude se trouve dans le domaine phytogéographique sub-sahélien. Les formations végétales rencontrées comprennent des savanes arborées, des savanes arbustives et des steppes à arbrisseaux. En outre, avec la situation du Yatenga entre les isohyètes 500 et 600mm, et de la surexploitation agricole, de la demande rurale et citadine toujours plus grande en bois de chauffe, cette savane s'apparente maintenant à une savane steppique dans le Nord de la province [17]. Les sols sont en grande partie des sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés plus ou moins profonds [18] ou leptosols ferriques ou pétroplinthiques [19]. Ce sont des sols généralement peu profonds, pauvres en matière organique et à texture déséquilibrée (riches en sables et limons grossiers) qui prennent facilement en masse [20].



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a été installé dans les parcelles de zaï d'âge différent (20, 21, 24 et 30 ans). Ces parcelles ont été mises en culture par la technique du zaï, puis laissées en jachère pendant plusieurs années au profit de la régénération herbacée et ligneuse [21]. La parcelle de zaï toute entière s'organise autour d'une butte cuirassée (Figure 2). Pour le dispositif, quatre transects ont été tracés des quatre (4) côtés de la butte cuirassée, des hauteurs vers le glacis de manière à traverser les quatre(4) parcelles de zaï forestier d'âge différents (20, 21, 24 et 30 ans). Sur chaque transect, 40 petits carrés (0,5x0,5m) ont été placés pour la collecte des herbacées, les mesures de l'activité microbienne du sol. Autour de chaque petit carré (0,5x0,5m), des grands carrés (3x3m) ont été placés afin de suivre la végétation ligneuse (Figure 2).

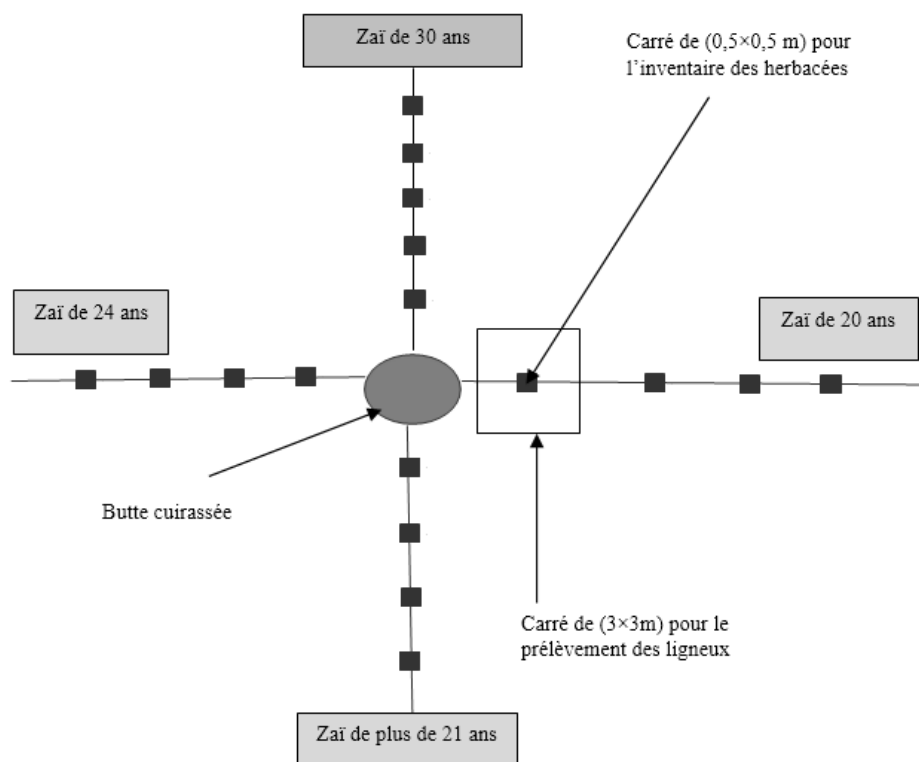


Figure 2: Dispositif expérimental pour l'étude de la végétation, du sol et de sa faune du sol

Etude de la végétation

L'étude des herbacées a été effectuée dans les carrés de 0,5 x 0,5 m de côté placés tous les 3m le long de chaque transect. Les herbacées sont triées par espèces et par carré et la matière sèche a été évaluée après passage à l'étuve. Toute la litière a été par la suite ramassée et pesée dans chaque carré de 0,5x 0,5m.

L'inventaire des ligneux (espèces, abondance) a été effectué dans les grands carrés (3 x3 m), placés de façon à encadrer chaque petit carré de (0,5x 0,5 m). L'échantillonnage a consisté à identifier pied par pied tous les individus ligneux. Seuls les individus ayant une hauteur supérieure à 50 cm et une circonférence supérieure à 5 cm ont été ensuite mesurés. Les individus non mesurés sont considérés comme plantules

Etude du sol

Des prélèvements systématiques ont été effectués dans les petits carrés de (0,5 x 0,5 m) au niveau des profondeurs (0-5 cm). Les paramètres de mesure ont concerné la respirométrie et la biomasse microbienne du sol. Les échantillons de sol ont été incubés et le dégagement du CO₂ a été mesuré journalièrement par injection directe dans un micro-Chromatographe en phase gazeuse de type SRA analytical Instruments (MTI P 200 MicrosensorTechnologyInc; Fremont, CA, USA). Au septième jour, la quantification de la biomasse microbienne a été mesurée par la méthode de Fumigation-Extraction[22, 23].

Analyses statistiques

Nous avons utilisé pour cela deux estimateurs non paramétriques, Chao et Jackknife [24], pour estimer la diversité spécifique des ligneux et des herbacées. Ces estimateurs de diversité spécifique, basés sur la présence/absence et l'abondance, permettent de mieux estimer la richesse spécifique présente, comparativement au nombre d'espèces observé qui lui, sous-estime le nombre réel d'espèces présentes[25]. De plus, l'utilisation de ces estimateurs se justifie par le fait qu'ils ne sont pas influencés par la présence d'espèces rares, contrairement à l'indice de Shannon (H). Le logiciel EstimateS 8.00 [26] a été utilisé pour le calcul de ces indices. Les paramètres physico-chimiques ont été analysés à l'aide du logiciel SPSS 19.0 (IBM Corporation, USA).

La normalité et l'homogénéité de variance des données ont été vérifiées avant de procéder aux analyses de variance. Lorsqu'une différence est détectée, le test de comparaison de Tukey au seuil de 5% est utilisé par la suite pour des comparaisons multiples.

III. RESULTATS

3.1. Composition floristiques des parcelles

Au total, 27 espèces ligneuses appartenant à 16 familles ont été rencontrées (Tableau I). Les familles les plus représentées sont les Combretaceae (49,28%), les Caesalpiniaceae (27,9%), et les Mimosaceae (6,52%). Au niveau des herbacées, la liste floristique se compose de 50 espèces appartenant à 19 familles. Les plus représentées sont les suivantes: les Poaceae (26,4%), les Fabaceae (21,7%) et les Rubiaceae (20,5%). Les résultats ci-dessus attestent de la colonisation des parcelles de zaï par de nombreuses espèces végétales appartenant à plusieurs familles. L'examen de la composition floristique herbacée révèle une nette prédominance de Poaceae. En outre, la composition ligneuse est représentée essentiellement par les Combretaceae et les Caesalpiniaceae. Les résultats de l'analyse des estimateurs de richesse spécifique donnent une variation de 3 à 6 espèces ligneuses entre le nombre exacte d'espèces ligneuses observées et le nombre théorique d'espèces calculées. Pour les herbacées, la variation est de 5 à 11 espèces.

Tableau I : Résultat de l'analyse des estimateurs de richesse spécifique

	Espèces observées	Indices de richesse spécifiques	
		Jackknife 1	Jackknife 2
Ligneux	27	32,96 ±3,41	33±0
Herbacées	50	60,92 ± 3,47	61±0

3.2. Distribution du couvert végétal et âge du zaï forestier

La biomasse produite varie de 32,1 à 44,84 g.m² avec les biomasses les plus élevées dans les parcelles de 21 ans (41,12g.m²) et 20 ans (41,12 g.m²) (Tableau II). Cependant, l'analyse statistique ne relève pas de différences significatives. Les quantités de litière sont par contre statistiquement plus élevées (p<0,0001) dans les parcelles de zaï 21 ans et 20 ans avec respectivement les valeurs de 133,8g.m² et 193,6g.m². Les résultats sur la densité ligneuse ont montré des valeurs statistiquement plus élevées (p<0,01) dans les zaï de 24 ans (4289individus/ha) et 20 ans (4844individus/ha). La densité ligneuse est beaucoup plus faible dans la parcelle de zaï âgé de 30 ans avec seulement 2678 individus/ha.

Tableau II : Densité et biomasse herbacée en fonction des âges des parcelles de zaï (les valeurs suivies de lettres identiques signifient une différence non significative au seuil de 0,05)

Age du Zaï	Densité (individus/ha)	Biomasse herbacée (g.m ²)	Total litière (g.m ²)
30	2678 ^b ±531,11	33 ^a ±6,92	57,6 ^a ±14,4
24	4289 ^a ±294,44	32,1 ^a ±3,84	74,86 ^{ab} ±3,84
21	3589 ^{ab} ±610	41,12 ^a ±7,92	133,8 ^{bc} ±7,92
20	4844 ^a ±862,22	44,84 ^a ±11,2	193,6 ^c ±11,2

3.2 Potentiel respiratoire des sols des différents âges de zaï forestier

Le Tableau III présente les quantités totales de C-CO₂ (mg/kg de sol) dégagées pendant sept (7) jours et les quantités de biomasse microbienne. Les quantités élevées de C-CO₂ (mg/Kg sol) sont observées dans les parcelles de 24 ans (87 mg C-CO₂/Kg sol) et 21 ans (81,28 mg C-CO₂/Kg sol). La parcelle de 30 ans contre toute attente a montré des valeurs de respiration et de biomasse microbienne les plus faibles. En effet, les écarts entre les zaï de 30 et 24 ans sont de 37% pour les quantités de C-CO₂ et jusqu'à 57% pour la biomasse microbienne.

Tableau III : Potentiel respiratoire du sol selon les parcelles de zaï (les valeurs suivies de lettres identiques signifient une différence non significative au seuil de 0,05)

Age du zaï	Quantité de CO ₂ (mg/kg de sol)	Biomasse microbienne (µg C/g sol)
20 ans	81,28 ^a ±7,34	58,33 ^b ±4,04
21 ans	76,93 ^b ±6,31	56,42 ^b ±6,06
24 ans	87 ^a ±9,65	101,33 ^a ±7,21
30 ans	54,71 ^c ±4,66	46,08 ^c ±3,78

IV. DISCUSSION

La dégradation des terres a concouru à la formation des sols nus pratiquement sur lesquels rien ne pousse : c'est le cas des « zipella » (clairière ou zone blanche en langue mooré) [27, 28], des « hardés » au Nord du Cameroun [29]. La pratique du zaï a montré son efficacité dans la réhabilitation des zones dénudées tant pour la production agricole (zaï agricole) que pour la restauration du couvert végétal (zaï forestier). En effet, nos résultats d'étude ont montré une colonisation des parcelles de zaï par de nombreuses espèces végétales appartenant à plusieurs familles. Ces résultats corroborent ceux trouvés en milieux sahéliens par certains auteurs [30, 31] qui ont tous noté une amélioration de la diversité floristique avec les mesures anti-érosives. Le zaï permet de lever rapidement la contrainte hydrique du sol et favorise le retour de la biodiversité [32]. Dans les parcelles paysannes traitées en zaï, il y a souvent un retour rapide et important de la flore herbacée et ligneuse. Les précédents travaux ont observé dans les tas de poudrette près d'une douzaine d'espèces légumineuses arbustives consommées par le bétail [6, 29]. Par ailleurs, l'observation en fonction des âges de zaï a indiqué des densités ligneuses, des biomasses herbacées ainsi qu'une quantité de litière plus fortes dans les zaï 20, 21 et 24 ans. Par contre, dans la parcelle de zaï 30 ans, ces différents paramètres mesurés demeurent les plus faibles. Cela pourrait avoir une explication dans l'historique de la parcelle de zaï de 30 ans. En effet, un feu accidentel aurait ravagé cette parcelle qui fût par la suite abandonnée. La reprise du couvert végétal a été sérieusement affectée par le passage du feu. Des travaux sur le feu ont relevé son effet qui pourrait être négatif sur la végétation ligneuse [33]. Concernant la biomasse herbacée, bien qu'une nette amélioration soit relevée, il faudrait tout de même noter que nos valeurs de biomasse variant de 0,33 à 0,44t/ha demeurent faibles par rapport à celles relevées dans les savanes soudanaises en Afrique de l'Ouest [34-36]. Au niveau du sol, les dégagements de CO₂ traduisant une activité microbienne effective a été relevé dans les différents âges de zaï avec cependant des valeurs beaucoup plus faibles dans le zaï 30 ans. En effet, le relèvement du dégagement de CO₂ avait été déjà relevé dans les parcelles de zaï agricole [37]. En outre, la recolonisation des parcelles par la végétation contribue à booster encore plus l'activité microbienne du sol. Ces conclusions s'inscrivent dans la même logique de plusieurs auteurs qui ont montré que la respiration du sol est effectivement fonction de la population microbienne, leur diversité, les enzymes métaboliques secrétées et la composition des amendements appliqués ainsi que la végétation présente [38].

V. CONCLUSION

Pour produire sur des terres, autrement improductives et les restaurer, les paysans exploitent des services que le zaï et les ligneux qui y poussent peuvent apporter. Le système zaï permet en effet de concentrer les ressources hydriques, minérales et organiques et la colonisation végétative du milieu facilite en effet les médiations et les interactions avec l'activité biologique. En outre, les résultats de cette étude ont montré que les terres dégradées ou « zipella » peuvent être restaurées par la technique traditionnelle du zaï pour la production agricole et écologique. La combinaison du zaï et des arbustes peut s'avérer une approche intéressante pour la restauration de la fertilité du sol et l'accroissement de la productivité primaire des terres.

REFERENCES

- [1]. Collins, A.L., et al., Using 137Cs measurements to quantify soil erosion and redistribution rates for areas under different land use in the Upper Kaley River basin, southern Zambia. *Geoderma* **104**(3-4): p. 299-323.
- [2]. (UN), U.N., UN Secretary General's report A/544/2000 Chapter C. "Defending the Soil". New York. . 2000.
- [3]. Agency), I.I.A.E., Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies. 2014, Vienna: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.
- [4]. Nyamekye, C., et al., Soil and Water Conservation in Burkina Faso, West Africa. *Sustainability*, 2018, **10**(9): p. 3182.
- [5]. Reij, C., G. Tappan, and M. Smale, Re-greening the sahel : farmer-led innovation in Burkina Faso and Niger., in *In Millions Fed : Proven Successes in Agricultural Development* .; 2009, Spielman D.J., Pandya-Lorchpp, R., Eds. ; International Food Policy Research Institute: Washington, DC, USA, 2009 p. 53-58.
- [6]. Roose, E., P. Dugué, and L. Rodriguez, L'aménagement des terroirs villageois et l'amélioration de la production agricole au Yatenga (Burkina Faso). Une expérience de recherche-développement. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologique*, 1993, **27**(2): p. 385-402.

- [7]. Hien, F. and A. Ouédraogo, Joint analysis of the sustainability of a local SWC technique in Burkina Faso. 2001, in: Reij C. Waters-Bayer A (eds.) *Farmer Innovatio in Africa: A source of Inspiration for Agricultural Development* Earthscan: London, UK. p. Pp. 256-266.
- [8]. Barbier, B., H. Yacouba, and H.e.a. Karambiri, Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel: Farmers' Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso. *Environmental Management*, 2009. **43**: p. 790–803.
- [9]. Sawadogo, H., Using soil and water conservation techniques to rehabilitate degraded lands in northwestern Burkina Faso. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2011. **9**(1): p. 120-128.
- [10]. Ouédraogo, I., Land use dynamics and demographic change in southern Burkina Faso. 2010, Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden.
- [11]. Kaboré, P.D. and C. Reij, The emergence and spreading of an improved traditional soil and water conservation in Burkina Faso. Environment and production technology division discussion paper. 2004, Washington,DC, USA: International Food Policy Research Institute.
- [12]. Koutou, M., et al., Déterminants de l'adoption du zai forestier et perspectives de valorisation de la technique (province du Yatenga, Burkina Faso) in Actes des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 novembre 2007. 2007. p. 10p.
- [13]. Ambouta, J.M., I.B. Moussa, and Ousmane S.D., Réhabilitation de jachère dégradée par les techniques de paillage et de zai au sahel, in La jachère en Afrique tropicale: rôle, aménagement, alternatives. 1999, In Floret C. et Pontanier R.: Paris. p. pp. 751-759.
- [14]. Zougmore, R., A. Jalloh, and A. Tioro, Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: a review of evidence and analysis of stone bunds and zai techniques. *Agric & Food Secur.* 2014. **3**(16).
- [15]. Nyamekye, C., et al., Soil and Water Conservation in Burkina Faso, West Africa. *Sustainability*, 2018. **10**(9): p. 3182-3182.
- [16]. UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Carte de la repartition des regions arides. Notes techniques du MAB 71977, UNESCO, Paris.
- [17]. Bourzat, D., Recapitalisation du cheptel (Yatenga, Burkina Faso) ed. I.I.d.A.a. sahel. Vol. Tome III. 1992: CIRAD-IEMVT.
- [18]. CPCSC, Classification des sols. Travaux de la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (1963-1967). 1967, Paris: ENSA-Grignon, Laboratoire de Pédologie-Géologie.
- [19]. FAO, World reference base for soil resources, in *World Soil Resources Reports*. 1998.
- [20]. Hien, E., et al., Sustainable farming systems in the sub-sahelian zone of Burkina Faso-Key factors. *Sustainability Debate*, 2010. **Vol. 1 No. 2 (2010)**
- [21]. Doamba, S.W.M.F., Effet du zai forestier sur l'évolution de la biodiversité et des paramètres physiques, chimiques et biologiques du sol. 2007, Université Polytechnique de Bobo Dioulasso (Burkina Faso). p. 111.
- [22]. Vance, E.D., P.C. Brookes, and D.S. Jenkinson, An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol. Biochem.* , 1987(19): p. 703–707.
- [23]. Amato, M. and J.N. Ladd, Assay for microbial biomass based on ninhydrin- reactive nitrogen in extracts of fumigated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 1988. **20**: p. 107-114.
- [24]. Chao, A., Estimating the population size for capture-recapture data with unequal catchability. *Biometrics*, 1987. **43**: p. 783-91.
- [25]. Chadzon, L.R., et al., Statistical methods for estimating species richness of woody regeneration in primary and secondary rain forest of Northeastern Costa Rica, in In: *Forest biodiversity research, monitoring and modeling: conceptual background and old world case studies* (eds. F. Dallmeier et J.A. Comiskey) Unesco Paris and the Parthnon Publishing Group. 1998. p. pp285-308.
- [26]. Colwell, R.K., in *EstimateS: statistical estimation of species richness and shared species from samples*. 2006, <http://viceroy.eeb.uconn.edu/estimates>.
- [27]. Zombré, N.P., Les sols très dégradés « zipella » du centre nord du Burkina Faso : dynamique, caractérisations morpho-biologiques et impacts des techniques de restauration sur leur productivité. 2003, Thèse de doctorat d'Etat es Sciences naturelles: Université de Ouagadougou, Burkina Faso. p. 326p.
- [28]. Zougmore, R., A. Jalloh, and A. Tioro, Climate-smart soil water and nutrient management options in semiarid West Africa: A review of evidence and analysis of stone bunds and zai techniques. *Agric. Food Secur.* , 2014. **3**(16): p. 8p.
- [29]. Roose, E., V. Kabore, and C. Guénat, Zai practice: A West African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1999. **13**(4): p. 343-355.
- [30]. Kiéma, A., A. Nianogo, and C. Kaboré-Zougrana, Étude bilan des aménagements anti-érosifs dans les pâturages en région sahélienne du Burkina Faso. *Études Rech. Sahé.*, 2007. **13**: p. 21-28.
- [31]. Yameogo, J.T., et al., Effet des techniques de conservation des eaux et des sols, zai forestier et cordons pierreux, sur la réhabilitation de la végétation herbacée à l'Ouest du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2011. **5**(1): p. 56-71.
- [32]. Roose, E., V. Kabore, and C. Guénat, Le Zai : fonctionnement, limites et améliorations d'une pratique africaine de réhabilitation de la végétation et de la productivité des terres dégradées en région soudano-sahélienne (Burkina Faso). *Cah. ORSTOM Pédol.*, 1993. **28**, 2: p. 159-173.
- [33]. N'Dri, A.B., et al., The dynamics of hollowing in annually burnt savanna trees and its effect on adult tree mortality. *Plant Ecol.*, 2014. **215**: p. 27–37.
- [34]. Savadogo, P., D.L.S. Tiveau, and M. Tigabu, Herbaceous species responses to long term effects of prescribe fire, grazing and selective cutting tree in the savanna woodland of West Africa. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and systematics* 2008. **10**: p. 179-195.
- [35]. Sow, M., et al., Fuel and fire behavior analysis for early-season prescribed fire planning in Sudanian and Sahelian savannas. *Journal of Arid Environments*, 2013. **89**: p. 84-93.
- [36]. Doamba, S.W.M.F., P. Savadogo, and H.B. Nacro, Modifications induced in soil physicochemical properties by repeated fire for different fuel load treatment in a west savanna-woodland, *Journal of Soil Science and Environmental Management*. Vol.11 (4), 2020: p. 164-175.
- [37]. Dabré, A., et al., Effets d'amendements organiques et phosphatés sous zai sur les propriétés chimiques et biologiques du sol et la qualité de la matière organique en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 2017. **11**(1): p. 473-487.
- [38]. Wang, W., et al., Contribution of root respiration to total soil respiration in a *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. Grassland of Northeast China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006. **48**(4): p. 409-414.