



Analyse intégrée de la flore, de la diversité des adventices et du stockage du carbone du sol de trois agrosystèmes maraîchers tropicaux du sud Togo

[Integrated analysis of the flora, specific diversity of weeds and carbon storage in three tropical vegetable agrosystems in southern Togo]

Massama-Esso Agbamaro^{1*}, Madjouma Kanda¹, Abalo Atato², Essossimna Magamana¹, Wouyo Atakpama¹, Banlipo Djakambi¹, Baholy Rahelivololoniaina Robijaona³, Marra Dourma¹, Komlan Batawila¹ & Koffi Akpagana¹

¹Laboratoire de botanique et écologie végétale (LBEV), Département de Botanique, Faculté des Sciences (FDS), Université de Lomé (UL), 1 BP 1515 Lomé 1, Togo

²Faculté des Sciences et Techniques (FaST), Université de Kara, BP 43, Kara-Togo

³Département des Sciences et Techniques de l'Environnement en Génie de Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique, Lot II K 38 Bis Ankadivato, 101 Antananarivo, Université d'Antananarivo-Madagascar

Résumé

Face à l'intensification des pratiques agricoles et aux pressions anthropiques croissantes sur les ressources naturelles, les agrosystèmes tropicaux sont confrontés à une double exigence : maintenir leur productivité tout en préservant les fonctions écologiques essentielles, telles que la conservation de la biodiversité et la séquestration du carbone. Dans ce contexte, la compréhension des interactions entre diversité floristique et potentiel de séquestration du carbone dans les agroécosystèmes constitue un enjeu scientifique et écologique majeur, particulièrement dans les régions tropicales d'Afrique de l'Ouest, où les données demeurent encore limitées. Cette étude s'inscrit dans cette problématique et vise à caractériser la florule, la diversité spécifique et les stocks de carbone de trois agrosystèmes du sud du Togo : le bas-fond d'Atti-Apédokoé, la basse vallée du Zio et le cordon sableux. Pour ce faire, des analyses multivariées (classification hiérarchique basée sur la distance de Bray-Curtis et méthode de Ward, analyse en composantes principales) ont été combinées à des indices de diversité (Shannon, Simpson, Pielou) et de dissimilarité (Jaccard) afin de caractériser des communautés végétales écologiquement homogènes. Les taux de carbone ont été comparés à l'aide d'une ANOVA et de tests post-hoc de Tukey. Les résultats révèlent une forte hétérogénéité floristique entre les placettes, avec une richesse spécifique élevée dans certaines zones (P13 à P18) et faible dans d'autres (P2 à P4). Le bas-fond d'Atti-Apédokoé se démarque par sa richesse floristique et une composition spécifique unique, avec des indices de dissimilarité de Jaccard supérieurs à 0,70. Les taux de carbone suivent la même tendance : les placettes les plus diversifiées présentent des stocks significativement plus élevés, en particulier à Atti-Apédokoé (ANOVA : $F = 60,13$; $p < 0,001$). Ces résultats suggèrent un lien fort entre diversité floristique et séquestration du carbone, influencé par la structure végétale et les caractéristiques du sol. L'étude souligne l'intérêt de promouvoir des pratiques agroécologiques favorables à la diversité végétale, dans une perspective de durabilité des systèmes agricoles tropicaux.

Mots clés : diversité floristique, adventices, agrosystèmes maraîchers, carbone organique du sol, analyse multivariée, Sud Togo.

Abstract

Faced with the intensification of agricultural practices and increasing anthropogenic pressures on natural resources, tropical agrosystems are facing a dual requirement: maintaining their productivity while preserving essential ecological functions, such as biodiversity conservation and carbon sequestration. In this context, understanding the interactions between floristic diversity and carbon sequestration potential in agroecosystems is a major scientific and ecological challenge, particularly in tropical regions of West Africa, where data remain limited. This study addresses this issue and aims to characterize floristic composition, species diversity and carbon stocks in three agrosystems in southern Togo: the Atti-Apédokoé lowland, the lower Zio valley and the sandbank. To do this, multivariate analyses (hierarchical clustering based on Bray-Curtis distance and Ward method, principal component analysis) were combined with diversity indices (Shannon, Simpson, Pielou) and dissimilarity (Jaccard) to characterize ecologically homogeneous plant communities. Carbon levels were compared using ANOVA and Tukey post-hoc tests. The results reveal a strong floristic heterogeneity between the plots, with high species richness in some areas (P13 to P18) and low in others (P2 to P4). The Atti-Apédokoé lowland stands out for its floristic richness and unique species composition, with Jaccard dissimilarity indices greater than 0.70. Carbon levels follow the same trend: the most diverse plots have significantly higher stocks, particularly in Atti-Apédokoé (ANOVA: $F = 60.13$; $p < 0.001$). These results suggest a strong link between floristic diversity and carbon sequestration, influenced by plant structure and soil characteristics. The study highlights the importance of promoting agroecological practices that promote plant diversity, with a view to the sustainability of tropical agricultural systems.

Keywords: floristic diversity, weeds, market gardening agrosystems, soil organic carbon, multivariate analysis, southern Togo.

*Auteur correspondant: Massama-Esso Agbamaro, (abel92agbamaro@gmail.com). Tél. : (+228) 92291453

<https://orcid.org/0009-0005-0536-1029>; Reçu le 12/06/2025; Révisé le 30/06/2025; Accepté le 23/07/2025

DOI: <https://doi.org/10.59228/rcst.025.v4.i3.173>

Copyright: ©2025 Massama-Esso et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License (CC-BY-NC-SA 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

1. Introduction

Les périmètres maraîchers périurbains du Sud-Togo jouent un rôle stratégique dans l'approvisionnement des centres urbains en produits frais légumes et fruits prisés par les ménages et les structures de restauration de la place. La gestion de ces espaces agricoles (entretien et vente de produits de récolte) constitue également une source importante de revenus pour les ménages ruraux et périurbains (Kanda et al., 2013). Implantés sur des sols hydromorphes, ferrugineux tropicaux ou sableux, ces espaces agricoles subissent une pression foncière croissante ainsi qu'une intensification des pratiques culturales (Saïdou et al., 2006 ; Hounkanrin, 2015 ; Kanda et al., 2017) qui compromettent leur pérennité.

De plus, toutes ces pressions d'origine anthropique sont couplées aux effets néfastes du changement climatique et ne permettent pas une production soutenue des agrosystèmes maraîchers, dont la fonction première est la lutte contre la faim. Cette situation fragilise une gestion durable des agrosystèmes maraîchers, la survie ainsi que leur productivité. Aussi, l'usage intensif d'engrais chimiques, de pesticides et le recours fréquent au désherbages mécaniques contribuent à la dégradation de la fertilité des sols et à la réduction de leur capacité de séquestration du carbone (Courte et al., 2020). Dans ce contexte, on assiste à une intrusion au sein des cultures par des espèces herbacées invasives qualifiées d'adventices, souvent perçues comme nuisibles, constituent en réalité un élément écologique complexe. Si elles entrent en compétition avec les cultures pour l'accès à la lumière, à l'eau et aux nutriments, leur présence est également influencée par les propriétés physico-chimiques du sol, notamment le pH et la teneur en carbone organique (Agbamaro et al., 2024).

Par ailleurs, les adventices de cultures peuvent jouer un rôle bénéfique dans la protection contre l'érosion, le maintien de la matière organique et la préservation de la biodiversité édaphique (Boudiar, 2022 ; Ghale et al., 2022). Dans cette optique, la séquestration du carbone dans les sols agricoles constitue un levier important pour atténuer le changement climatique, tout en améliorant la qualité des sols et leur productivité (Lal, 2018 ; Chiti et al., 2022). La promotion de pratiques agroécologiques telles que l'intégration d'espèces ligneuses, le paillage ou l'apport d'amendements organiques permettrait

d'en favoriser le stockage durable (Lembaid et al., 2021). Toutefois, les pratiques culturales intensives et la gestion des adventices peuvent fortement influencer ces processus (Chevallier et al., 2020).

Dans cette perspective, il urge de mieux comprendre les interactions entre la diversité floristique des adventices, les propriétés des sols et les modes de gestion agricoles afin d'optimiser la séquestration du carbone et renforcer la durabilité des systèmes maraîchers du sud du Togo. Il s'agit spécifiquement d'identifier la diversité spécifique et la florule des adventices de cultures associés aux agrosystèmes maraîchers de la plaine côtière et d'évaluer leur potentiel de séquestration du carbone.

2. Matériel et méthodes

2.1. Description de la zone d'étude

L'étude a été réalisée dans la région maritime du Togo (figure 1), chevauchant avec la plaine côtière du pays, incluse en zone écologique V définie par Ern (1979). Elle couvre 6 395 Km², soit environ 10,78% de la superficie totale du pays et s'étend entre 1°20' de longitude Ouest et 1°50' de longitude Est, puis entre 6°10' de latitude Sud et 6°60' de latitude Nord. La zone est délimitée (Ménot & Seddoh, 1985) au nord par la région des Plateaux (sur environ 130 Km), à l'ouest par la république du Ghana (environ 80 Km), à l'est par la république du Bénin (environ 100 Km) et au sud par l'Océan Atlantique (sur environ 50 Km).

Dans cette région, trois agrosystèmes représentatifs ont été ciblés pour l'étude, en raison de leur importance dans les activités maraîchères. Il s'agit notamment :

- du cordon sableux, situé sur la zone littorale du pays, entre la limite des eaux territoriales et une bande de 50 Km à l'intérieur des terres (Yao & Kossi, 2023). Il coïncide avec la région maritime selon le découpage administratif national et s'étend entre 1° 00'' et 1° 40'' de longitude Est, et entre 6° 05'' et 6° 50'' de latitude Nord. Bien que vulnérable à l'érosion côtière, la zone constitue un espace majeur de production maraîchère intensive, grâce à l'accès à l'eau et à la proximité des marchés urbains ;

- la basse vallée de Zio, correspond à la partie méridionale de la vallée localisée à cheval entre les préfectures de Zio et du Golfe. Elle couvre une superficie d'environ 400,66 km² et s'étend de Togblékopé à Davié, entre 6°11' et 6°25' de latitude Nord et entre 1°03' et 2°21' de longitude Est. La zone

est limitée à l'Ouest par la préfecture de l'Avé, à l'Est par les préfectures de Tabligbo et d' Afagnan, au Nord par la région des plateaux et au Sud par l'océan Atlantique (Gnazou et al., 2015). La disponibilité en ressources hydriques, notamment liées au fleuve Zio, favorise le développement de cultures telles que la canne à sucre et le maraîchage dans cette zone (Djangbedja et al., 2017)

- le bas fond d'Atti-Apedokoé, situé dans la préfecture de l'Avé, près d'Assahoun est exploité pour la production maraîchère, notamment en saison sèche. La zone est située au Nord- Ouest de la région Maritime, environ 50 Km de Lomé et s'étend entre 0°6' et 1°10' de longitude Est et entre 6°27' et 6°78' de latitude Nord sur 1146 Km,² soit environ 2 % du territoire national ou 17% de la région maritime. Elle est délimitée au Nord par la préfecture d'Agou, au Sud par la préfecture du Golfe, à l'Est par la préfecture de Zio et à l'Oest par la république du Ghana. Créée en 1991, la préfecture de l'Avé comptait environ 90 000 habitants en 2017 regroupe 38 villages répartis en sept cantons : Aképé, Noépé, Badja, Dzolo, Kévé, Assahoum, Tovégan jusqu'en 2017 (Bigma et al., 2021) (figure 1).

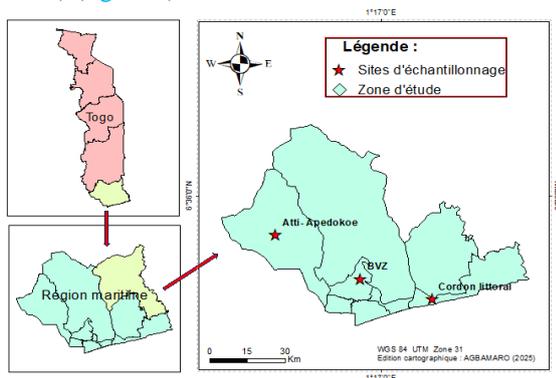


Figure 1. Localisation de la zone littorale dans la région maritime et situation au Togo

2.2. Méthodologie

2.2.1. Dispositif de collecte des données

Des relevés d'inventaires floristiques couplés à des inventaires écologiques ont été réalisés au début de la saison sèche, en novembre 2024, dans trois agrosystèmes maraîchers distincts : le cordon sableux, la basse vallée du Zio et le bas-fond d'Atti-Apedokoé. La sélection des placettes dans chaque agrosystème a reposé sur des critères de représentativité écologique et de régularité des pratiques agricoles. Les zones sélectionnées étaient homogènes en termes d'usage du sol, accessibles, non perturbées, et situées à l'écart des limites de parcelles afin d'éviter les effets de bordure.

Au total, 18 placettes d'observation ont été installées, soit six par site.

Chaque placette, d'une superficie de 10 m × 10 m (soit 100 m²), a été implantée à une distance de 4 mètres des bordures des champs cultivés. Ce format permet une couverture suffisante de la diversité végétale tout en facilitant un échantillonnage rigoureux. La répétition de six placettes par site permet de capter la variabilité intra-agrosystème. À l'intérieur de chaque placette, neuf sous-placettes de 0,5 m × 0,5 m (soit 0,25 m²) ont été disposées de manière systématique : une à chaque coin, une au centre de chaque côté et une au centre de la placette, à l'intersection des diagonales (figure 2). Cette disposition a assuré une couverture homogène de la diversité floristique.

Parallèlement aux inventaires floristiques, des échantillons de sol ont été prélevés dans chacune des sous-placettes à l'aide d'une tarière manuelle, à une profondeur de 0 à 20 cm. Les prélèvements ont été réalisés au début de la saison sèche, en novembre 2024, période choisie pour sa stabilité hydrique et sa facilité d'accès aux parcelles.

Les échantillons ont été conditionnés dans des sachets plastiques, puis acheminés au Laboratoire de Botanique et d'Écologie Végétale. L'analyse du carbone organique a été réalisée selon une méthode standard permettant d'estimer la teneur en matière organique du sol.

Les espèces adventices ont été recensées dans chaque sous-placette, préférentiellement durant leur phase de floraison ou de fructification, afin d'en permettre une identification morphologique précise. Les déterminations taxonomiques ont été réalisées à l'aide d'ouvrages de référence reconnus, notamment : Hutchinson et Dalziel (1954-1972), Brunel et al. (1984), Lebrun (1973), Akoègninou et al. (2006). En cas de doute, des échantillons ont été prélevés, séchés, étiquetés et confrontés aux collections de l'herbier du laboratoire. Un contrôle qualité a été assuré par une double vérification des identifications par deux botanistes indépendants. En cas de discordance, un consensus a été obtenu par discussion ou recours à des experts externes.

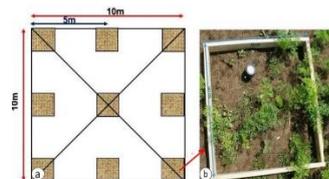


Figure 2. Dispositif expérimental d'installation des placettes (a) et sous-placette (b) dans les périmètres maraîchers selon Florad et al 2014

2.2.2. Analyse des données floristiques

L'analyse floristique repose à la fois sur la diversité alpha (au sein des placettes) et bêta (entre placettes), évaluée à travers des indices classiques. Ces indices ont permis d'évaluer la diversité spécifique des agrosystèmes en adventices et la structuration de ces agrosystèmes :

- La richesse spécifique (S). Elle désigne le nombre total d'espèces recensées dans un agrosystème. Il donne une vision sur de la diversité taxonomique brute.
- L'indice de Shannon-Wiener (H) (Shannon, 1948) définit par la formule :

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i$$

où $P_i = n_i/n$, avec n_i le recouvrement de l'espèce i et n la somme des recouvrements de toutes les espèces du relevé. Cet indice varie généralement entre 1 et 5 bits. Une valeur de $H' > 3,5$ reflète une grande diversité (milieu favorable), tandis que celle de $H' < 2,6$ indique un milieu contraignant dominé par peu d'espèces.

- L'équitabilité de Pielou (E) (Pielou, 1969)

$$E = \frac{H'}{H'_{max}}$$

Avec $H'_{max} = \log_2(S)$, S désignant la richesse spécifique. E est compris entre 0 et 1. Une valeur proche de 0 traduit une forte domination par quelques espèces tandis qu'une valeur proche de 1 indique une répartition équilibrée des recouvrements entre espèces.

- L'indice de Jaccard (I_j)

$$I_j = \frac{C}{A + B - C}$$

Où A et B représentent les ensembles d'espèces des groupements A et B respectifs, et C les espèces communes. Une valeur de $I_j < 0,5$ indique une faible similarité floristique, tandis que celle de $I_j > 0,5$ traduit une forte similarité entre communautés végétales (Yabi et al., 2013.)

- L'indice de Simpson

L'indice de Simpson (D) mesure la probabilité que deux individus choisis au hasard appartiennent à la même espèce dans un échantillon. Il est souvent utilisé pour évaluer la diversité spécifique d'un peuplement (Bouza & Covarrubias., 2005). Cet indice a été utilisé pour comparer la dominance des adventices dans les agrosystèmes étudiés.

$$D = \sum \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Avec n_i , nombre d'individus de l'espèce i ; N : nombre total d'individus de toutes les espèces confondues dans un peuplement. Plus D est proche de 1, plus la diversité est faible (dominance d'une espèce) ; plus D est proche de 0, plus la diversité est élevée.

2.2.3. Traitement des échantillons de sol collectés

Afin de déterminer la teneur en carbone des sols maraîchers étudiés, un protocole d'extraction aqueuse a été appliqué aux échantillons avant leur analyse au Neuron BC. Cette méthode vise à extraire la fraction biodisponible du carbone présent dans le sol, notamment le carbone organique dissous (CO₂). Les échantillons de sol prélevés, une fois au laboratoire ont été séchés à l'air libre pendant plusieurs jours pour éliminer l'humidité naturelle. Une fois secs, les échantillons ont été tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm afin de retirer les fragments grossiers (racines, graviers, débris organiques), et d'uniformiser la fraction fine du sol utilisée pour l'analyse. Suite à cette étape 10 g de sol tamisé a été introduite dans un bécher propre, puis mélangée à 50 ml d'eau distillée, suivant un rapport masse/volume défini (1 : 5).

Le mélange a été agité manuellement afin d'extraire le carbone dissous. Après l'agitation, le mélange est laissé au repos pendant 2 heures pour permettre la décantation des particules solides. Le surnageant clair obtenu a été soigneusement recueilli à l'aide d'une pipette stérile puis transféré dans des tubes pour les analyses. Les échantillons liquides ainsi préparés ont été analysés à l'aide du Neuron BC, un analyseur automatique de carbone organique. Grâce à son tube capillaire, l'appareil a permis la détection et la quantification du carbone présent dans l'extrait aqueux, sous forme de carbone organique.

2.2.4. Analyses statistiques

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé à l'aide du logiciel R® version 4.4.3. Plusieurs approches ont été mobilisées pour interpréter les structures floristiques et les relations entre pratiques agricoles et séquestration du carbone :

- la classification hiérarchique ascendante (CAH) : basée sur la distance de Bray-Curtis (tenant compte de l'abondance relative des espèces) et la méthode d'agrégation de Ward,

permettant la formation de groupes homogènes visualisés sous forme de dendrogramme ;

- l'analyse en composantes principales (ACP) : utilisée pour réduire la dimensionnalité des données floristiques et mettre en évidence les espèces discriminantes ainsi que les gradients écologiques structurant la végétation ;
- l'indices de diversité : Shannon (diversité globale), Simpson (dominance) et Equitabilité de Pielou (répartition des abondance). Ces indicateurs permettent d'apprécier la richesse, l'équilibre et la stabilité des communautés végétales ;
- l'analyse de la similarité inter-sites : basée sur l'indice de Jaccard, permettant la construction d'un dendrogramme comparatif entre milieux étudiés ; l'analyse de la variance (ANOVA) : suivie du test post-hoc de Tukey HSD pour comparer les taux moyens du carbone entre agrosystèmes. Cette approche a permis d'identifier les effets significatifs des conditions agroécologiques sur la séquestration du carbone.

3. Résultats et discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Discrimination des placettes sur la base de leur ressemblance floristique

L'objectif est d'identifier des ensembles de placettes écologiquement similaires sur la base de leur flore adventice. L'analyse s'appuie sur la distance de Bray-Curtis, sensible à l'abondance relative des espèces, comme mesure de dissimilarité et la méthode de Ward, comme méthode d'agrégation qui optimise la formation de groupes homogènes grâce à la classification hiérarchique ascendante (CAH) (figure 3). La structure de l'arbre révèle plusieurs clusters bien définis, reflétant des proximités floristiques marquées.

Au seuil de 65 % de dissimilarité, les relevés d'inventaires floristiques se discriminent en six groupes distincts qui correspondent à des groupements végétaux ou à des groupes écologiques distincts. Les placettes P17 et P18 se regroupent à une très faible hauteur indiquant qu'elles partagent une composition floristique presque identique, les conditions écologiques semblables et les mêmes pratiques culturales. Un phénomène similaire est observé pour les placettes P15 ; P16 et P13 ; P14 qui fusionnent également rapidement, suggérant des conditions

écologiques proches ou des pratiques culturales similaires influençant la flore.

D'autres regroupements plus larges apparaissent à un niveau supérieur de l'arbre. Les placettes P1, P9, P10 et P6 forment un groupe distinct, relativement homogène. Ce groupe pourrait correspondre à une communauté spécifique d'adventices, différente de celle observée dans les précédents clusters. À l'inverse, certaines placettes telles que P2, P3, P4, P5 apparaissent plus dispersées, dans l'arbre suggérant une plus grande variabilité écologique ou des compositions spécifiques plus mixtes

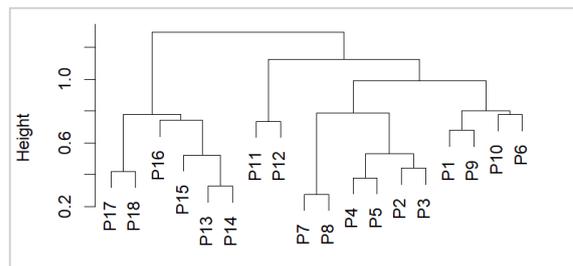


Figure 3. Classification hiérarchique des placettes en se basant sur la distance de Bray-Curtis comme mesure de dissimilarité et la méthode de Ward comme méthode d'agrégation

3.1.2. Bilan floristique des adventices de cultures

La richesse spécifique d'espèces adventices recensées est variable d'une placette à l'autre (figure 4). Certaines placettes, notamment P13, P14, P15 et P18, se distinguent par une richesse spécifique particulièrement élevée plus de 30 espèces d'adventices, P18 affichant le plus important nombre d'espèces adventices recensées (37 espèces). À l'inverse, des placettes comme P10, P2, P3 et P4 présentent une richesse inférieure à 20 espèces d'adventices recensées, nettement plus faible, traduisant une biodiversité plus réduite dans ces zones.

Les placettes P16 et P17 montrent également une richesse spécifique relativement élevée, tandis que P1, P5, P6, P7, P8, P9, P11 et P12, occupent une position intermédiaire. Cette distribution hétérogène de la richesse spécifique suggère l'existence de facteurs écologiques variables entre les placettes, influençant directement la diversité des espèces adventices présentes.

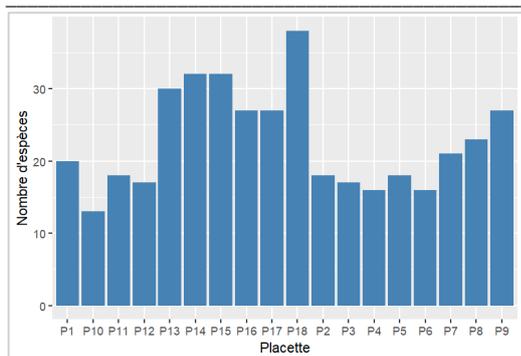


Figure 4. Richesse spécifique par placette

3.1.3. Analyse des associations espèces–placettes par ACP bidimensionnelle

Les résultats d'une analyse en composantes principales (ACP) permettant de visualiser simultanément les espèces et les placettes dans un espace bidimensionnel, construit à partir de leur composition floristique (figure 5). Chaque flèche noire représente une espèce, tandis que chaque point rouge correspond à une placette. Les deux premiers axes, Dim1 (14,7 %) et Dim2 (10,4 %) expliquent ensemble environ 25 % de la variance totale. Ce niveau de variance est relativement courant dans l'analyse de données écologiques complexes et signifie que le biplot constitue un outil utile, pour explorer les relations entre espèces et placettes.

Les flèches traduisent la direction et l'importance de la contribution des espèces à la structuration des axes. Une flèche longue indique une espèce fortement discriminante selon l'axe considéré tandis qu'une flèche courte ou centrée désigne une espèce peu discriminante. Ainsi, des espèces telles que *Ipomoea eriocarpa*, *Sporobolus pyramidalis* et *Setaria barbata* se démarquent par leur contribution marquée aux axes principaux, suggérant leur rôle structurant dans la différenciation floristique entre les placettes.

Concernant les placettes, les points rouges reflètent leur position relative dans l'espace écologique défini par l'ACP. Une placette située à proximité d'une flèche est probablement caractérisée par une forte présence de l'espèce correspondante. Par exemple, P16, fortement isolée dans la partie supérieure du graphique, semble présenter une composition floristique très spécifique, probablement dominée par *I. eriocarpa*. De même, les placettes P15, P9, et P6 positionnées en marge du nuage de points, témoignent de compositions spécifiques distinctes, influencées par des espèces déterminantes. À l'inverse, des placettes proches du centre du graphique partagent une

composition plus homogène, dominée par des espèces peu discriminantes. Cette représentation met ainsi en évidence une différenciation floristique marquée entre les placettes, reflet de la variabilité écologique locale ou de différences dans les pratiques culturales.

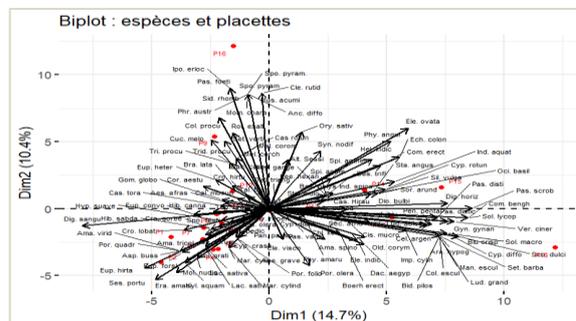


Figure 5. Analyse en Composantes Principales (ACP) suivant la composition floristique des placettes

3.1.4. Diversité spécifique et répartition floristique des adventices

L'analyse des indices de diversité met en évidence des différences significatives entre les trois sites étudiés (tableau I). Le bas-fond d'Atti-Apédokoé présente une richesse spécifique nettement plus élevée, avec 81 espèces recensées contre 53 espèces pour la basse vallée de Zio et 47 espèces pour le cordon sableux. Cette richesse floristique supérieure suggère que le bas-fond offre un environnement plus favorable au développement des adventices, potentiellement en raison d'une plus grande hétérogénéité des microhabitats, d'une meilleure fertilité des sols ou encore d'un niveau de perturbation anthropique modéré, favorable à une diversité accrue.

Cependant, malgré ces écarts en termes de richesse spécifique, les indices de diversité de Shannon et Simpson restent élevés et relativement similaires entre les trois sites. Cela indique que, bien que le nombre total d'espèces varie, la répartition relative des individus parmi les espèces est globalement équilibrée dans chaque site. Cette impression est confirmée par les indices de Pielou, qui sont tous égaux à 1, traduisant une équité parfaite dans la distribution des espèces adventices dans chaque site. Autrement dit, aucune espèce ne domine fortement les autres, ce qui témoigne d'un équilibre écologique dans chaque communauté végétale.

Tableau 1. Indices de diversité et de dissimilarité de Jaccard des sites étudiés

| Site | Richesse | Shannon | Simpson | Pielou | Indice de dissimilarité de Jaccard |
|--------------------------|----------|---------|---------|--------|------------------------------------|
| Bas-fond d'Atti-Apédokoé | 81 | 4,39 | 0,988 | 1 | 0,724 |
| Basse vallée de Zio | 53 | 3,97 | 0,981 | 1 | 0,757 |
| Cordon sableux | 47 | 3,85 | 0,979 | 1 | 0,718 |

3.1.5. Diversité inter-sites (dissimilarité de Jaccard)

L'analyse de la diversité inter-sites à travers les indices de dissimilarité de Jaccard révèle une forte différenciation floristique entre les milieux étudiés (tableau 1). Les valeurs de dissimilarité obtenues varient de 0,718 à 0,757, ce qui traduit une faible similarité en termes de composition spécifique entre les sites. Voici les observations principales :

- Séparation marquée du bas-fond d'Atti-Apédokoé : Ce site se distingue clairement en se séparant très tôt dans l'arbre, avec une hauteur élevée ($> 0,71$), indiquant une faible similarité floristique avec les autres. Cela souligne sa richesse spécifique et son caractère écologique particulier, avec de nombreuses espèces absentes des autres milieux. Cette situation s'explique d'une part, par la technique de culture surtout la rotation (polyculture certaines fois) et d'autres parts, par le mode de labour.
- Groupement de la basse vallée de Zio et du cordon sableux : Ces deux sites forment un cluster plus homogène, traduisant une floristique partagée malgré des différences en richesse. Cette proximité pourrait être liée à des conditions écologiques similaires : type de sol, régime hydrique, ou interventions humaines.

Donc l'analyse révèle trois communautés floristiques distinctes, avec le bas-fond d'Atti-Apédokoé en position clairement isolée, tandis que les deux autres sites semblent écologiquement proches, partageant une base floristique commune.

3.1.6. Similarité floristique entre les trois sites maraîchers

Le dendrogramme (figure 6) illustre l'analyse de similarité entre les communautés floristiques adventices. Cette analyse repose sur l'indice de Jaccard, qui se base sur la présence ou l'absence des espèces sans prendre en compte leurs abondances. Il

permet ainsi de mesurer la proximité entre les sites en fonction des espèces qu'ils partagent. La première observation notable concerne le bas-fond d'Atti-Apédokoé, qui se détache nettement des deux autres sites. En effet, il se sépare très tôt dans l'arborescence du dendrogramme, avec une hauteur (distance) relativement élevée ($> 0,71$), indiquant une faible similarité floristique avec la basse vallée du Zio et le cordon sableux. Ce résultat confirme que ce site est particulièrement riche et écologiquement distinct, abritant de nombreuses espèces absentes des autres milieux.

En revanche, les sites de la basse vallée de Zio et du cordon sableux forment un groupe plus homogène, suggérant qu'ils partagent un ensemble commun d'espèces, malgré leurs différences en termes de richesse floristique globale. Cette proximité pourrait s'expliquer par des conditions écologiques semblables telles que la nature des sols, le climat local, ou des pressions anthropiques comparables. Ainsi, cette analyse met en évidence trois communautés floristiques distinctes, mais souligne surtout la spécificité marquée du bas-fond d'Atti-Apédokoé. Quant à la basse vallée de Zio et au cordon sableux, leur similarité laisse penser qu'ils partagent une base écologique commune, bien que leur structure interne diffère.

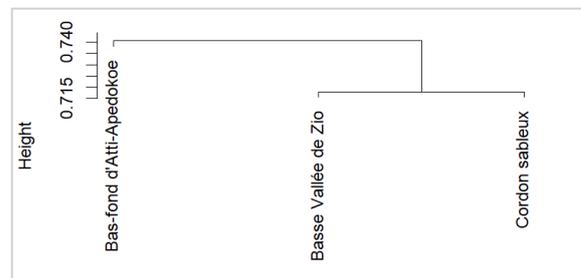


Figure 6. Similarité de Jaccard Hétérogénéité du stockage de carbone organique selon les placettes étudiées

La distribution des taux de carbone mesurés dans les différentes placette, présentée sous forme de diagrammes en boîte à moustaches (figure 7). Elle permet de visualiser à la fois la dispersion des valeurs, les médianes, ainsi que les éventuelles valeurs extrêmes. L'analyse des données révèle une nette disparité des taux de carbone entre les placettes. Un premier groupe, comprenant les placettes P1 à P12, affiche des taux de carbone extrêmement faibles, proches de zéro, avec une variabilité interne limitée. Cette faible teneur suggère que ces zones sont pauvres en matière organique, soit en raison d'une faible

productivité végétale, soit à cause de conditions écologiques peu favorables à l'accumulation de carbone (sols dégradés, perturbations anthropiques, etc.).

À l'opposé, un second groupe, composé des placettes P13 à P18, présente des taux de carbone significativement plus élevés et une variabilité interne plus importante. La placette P13 se distingue particulièrement par une médiane élevée et un étalement important des valeurs, indiquant une grande hétérogénéité de la teneur en carbone. La placette P15 présente également une médiane élevée, tandis que P14, P16, P17 et P18, bien que plus basses que P13 et P15, affichent des niveaux de carbone nettement supérieurs à ceux du premier groupe, avec des degrés de dispersion variables.

Ces résultats suggèrent que les placettes à faible teneur en carbone pourraient correspondre à des zones floristiquement appauvries, tandis que celles à forte teneur pourraient probablement représenter des écosystèmes plus riches en ces espèces adventives favorisant la production et l'accumulation de matière organique.

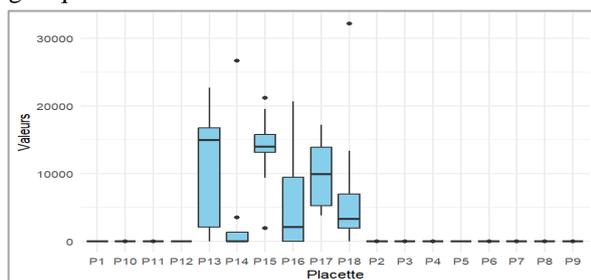


Figure 7. Distribution des valeurs du taux de carbone par placette

3.1.7. Distribution du taux de carbone par agrosystèmes

L'analyse de la variance (ANOVA) révèle un effet hautement significatif du type d'agrosystèmes sur le taux brut de carbone mesuré, ($F = 60,13$; $p < 2e-16$), indiquant que les différences observées entre les groupes ne sont pas dues au hasard. Plus précisément, la variabilité inter-agrosystèmes ($Sum Sq = 2,708 \times 10^9$) est nettement supérieure à la variabilité résiduelle ($Sum Sq = 3,580 \times 10^9$), ce qui témoigne d'un effet marqué du type d'agrosystème sur la séquestration de carbone.

Le test post-hoc de Tukey confirme que l'agrosystème "Atti-Apédokoé" présente des taux de carbone significativement plus élevés que les deux autres : les différences moyennes sont de :

- -8672,65 unités ($p < 0,000001$) par rapport à la Basse vallée de Zio,
- -8673,43 unités ($p < 0,000001$) par rapport au Littoral.

En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les agrosystèmes "Littoral" et "Basse vallée de Zio" (différence = -0,78 ; $p \approx 1$), ce qui suggère une homogénéité dans leur capacité à stocker le carbone.

Ces résultats indiquent clairement que seul l'agrosystème Atti-Apédokoé se distingue fortement par une accumulation exceptionnelle de carbone, probablement en lien avec des conditions agroécologiques particulières (sols, humidité, végétation) ou pratiques culturelles spécifiques qui mériteraient une investigation approfondie.

La figure 8 appuie ces résultats, illustrant visuellement les différences nettes entre Atti-Apédokoé et les deux autres agrosystèmes. Elle montre également l'absence de différence entre littoral et basse vallée du Zio, en parfaite cohérence avec les résultats statistiques.

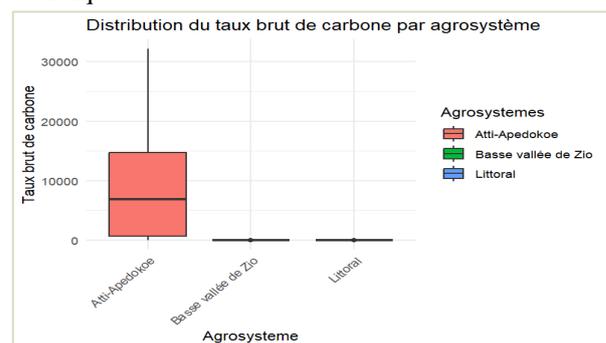


Figure 8. Distribution du taux de carbone par agrosystème

3.2. Discussion

L'analyse de classification hiérarchique des placettes, fondée sur la distance de Bray-Curtis et de la méthode de Ward, constitue une approche robuste et couramment utilisée pour identifier des groupes floristiques écologiquement cohérents. Ce type de méthode est reconnu pour son efficacité dans divers contextes écologiques, notamment en ce qui concerne la mise en évidence de structures végétales similaires et l'interprétation des regroupements biologiques (Murtagh & Legendre, 2011 ; Dominik et al., 2017). En particulier, la méthode de Ward, en minimisant la somme des carrés des distances intra-groupes, permet d'obtenir des clusters compacts, offrant une lecture écologique pertinente.

La richesse spécifique observée d'une placette à l'autre révèle une forte variabilité locale, très probablement influencée par des facteurs abiotiques (type de sol, humidité, micro-climat) et anthropiques (pratiques culturales, niveaux de perturbation). Ce constat a rejoint les résultats d'études antérieures qui ont mis en évidence le rôle central de l'hétérogénéité des micro-habitats, de la structure du sol et de la gestion agricole sur la distribution des espèces (Zheng *et al.*, 2024). De telles variations spatiales sont fréquentes dans les agrosystèmes tropicaux, où les pressions environnementales combinées aux actions humaines modèlent fortement la diversité floristique locale (Herrera *et al.*, 2021). Ces facteurs aussi bien biotiques qu'abiotiques ont permis de caractériser les espèces adventices spécifiques à ces facteurs.

L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de visualiser la dispersion des placettes dans l'espace multivarié et d'identifier la contribution différentielle des espèces à la structuration floristique. Comme l'ont montré plusieurs travaux, cette technique est particulièrement adaptée aux données écologiques complexes, où la variabilité est souvent répartie sur de nombreux axes (Zheng *et al.*, 2024). L'association marquée de certaines espèces notamment *Ipomoea eriocarpa* ou *Sporobolus pyramidalis*, aux axes principaux, suggère un rôle structurant de ces espèces dans la différenciation floristique. Ce type de contribution a également été observé dans d'autres milieux caractérisés par une forte hétérogénéité écologique (Dominik *et al.*, 2017).

L'analyse de la diversité inter-sites, à travers l'indice de dissimilarité de Jaccard confirme une forte différenciation floristique entre les sites étudiés. Des valeurs de dissimilarité supérieures à 0,7 indiquent une très faible similarité spécifique entre les communautés végétales, un seuil élevé selon la littérature sur la diversité bêta (Herrera *et al.*, 2021). Le site du Bas-fond d'Atti-Apédokoé se démarque clairement, suggérant qu'il pourrait jouer un rôle possible de réservoir de diversité floristique des adventices. Ces observations corroborent les résultats de Zheng *et al.* (2024), qui ont mis en évidence des différenciations marquées entre communautés végétales le long de gradients écologiques et d'occupation des sols. Ces résultats mettent en évidence les pratiques culturales adoptés dans chaque agrosystème et leur influence dans la composition des adventices.

Enfin, les différences très significatives de taux de carbone entre placettes, mises en évidence par l'ANOVA et le test post-hoc de Tukey, confirment

l'effet majeur des types d'agrosystèmes sur la capacité de séquestration du carbone. Le cas de l'agrosystème d'Atti-Apédokoé, avec des valeurs nettement supérieures, rejoint les résultats obtenus par Herrera *et al.* (2021), qui ont montré que la diversité végétale et les propriétés édaphiques influencent fortement la capacité de stockage du carbone dans les écosystèmes tropicaux. Ces résultats suggèrent l'existence d'un lien étroit entre la composition floristique, la diversité spécifique et le potentiel de séquestration du carbone, ce qui renforce l'intérêt à la fois écologique et agronomique de ces systèmes.

Donc, le taux de carbone d'un agrosystème dépend non seulement de sa composition floristique mais aussi de sa diversité spécifique, permettant ainsi de caractériser les espèces séquestrant plus de carbone

4. Conclusion

L'étude met en évidence une forte variabilité floristique et écologique entre les placettes et les sites étudiés. Le bas-fond d'Atti-Apédokoé se démarque nettement par sa richesse spécifique et son taux de carbone élevés, traduisant des conditions environnementales plus favorables et une meilleure capacité de séquestration du carbone. À l'inverse, la basse vallée de Zio et le cordon sableux présentent une biodiversité plus faible ainsi que des stocks de carbone plus modestes.

Ces résultats soulignent l'influence déterminante des conditions agroécologiques et des pratiques culturales sur la composition floristique et le fonctionnement écologique des agrosystèmes. En particulier, ils confirment que la diversité végétale constitue un levier essentiel pour renforcer la durabilité des systèmes agricoles et leur résilience face aux perturbations environnementales, notamment les changements climatiques. Dès lors, promouvoir et maintenir une diversité floristique élevée dans les agrosystèmes apparaît comme une stratégie agroécologique pertinente, à la fois pour améliorer la santé des écosystèmes et pour maximiser les services écosystémiques tels que la séquestration du carbone. Ces pratiques mettent l'accent particulier sur les espèces agroforestières qui non seulement permettent une gestion durable des terres mais aussi séquestrent considérablement le carbone.

Recommandation

Pour promouvoir des pratiques agroécologiques durables, il faut : Il faut combiner des pratiques agricoles qui améliorent les sols et la biodiversité comme la diversification des cultures et la réduction de

l'usage des intrants chimiques avec des soutiens techniques, financiers et politiques.

Remerciements

Nous remercions chaleureusement l'ensemble des personnels du Laboratoire de Botanique et Écologie Végétale (LBEV) pour leur accompagnement, leur disponibilité et leur appui tout au long de la réalisation de ce travail

Financement

Cette recherche a été financée par les fonds personnels du doctorant, auteur principal de ce manuscrit.

Conflit d'Intérêt

Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt lié à cette étude

Considérations Ethiques

Les travaux ont été menés conformément aux bonnes pratiques scientifiques, dans le respect de l'environnement et des réglementations locales en vigueur concernant l'accès au terrain, l'échantillonnage et la gestion des produits maraîchers

Contributions des Auteurs

M.A. ; M.K. ; A.A. ont conçu et supervisé l'étude, rédigé le manuscrit principal et validé la version finale.

M.A. ; E.M. ; W.A. ; M.K. ont participé à la collecte des données et à l'analyse statistique.

M.A. ; E.M. ; W.A. ont contribué à l'interprétation des résultats et à la relecture critique du manuscrit.

B.R.R. ; B.D. ; A.A. ont assuré la revue bibliographique et participé à la mise en forme du document.

M.D., M.K. ; K.B. ; K.A. ont validé les données, contribué à la discussion et donné l'approbation finale de la version à soumettre.

Tous les auteurs ont lu et approuvé la version finale du manuscrit.

ORCID des Auteurs

Massama-Esso A. : <https://orcid.org/0009-0005-0536-1029>

Madjouma K. <https://orcid.org/0009-0003-4605-8750>

Abalo A. : <https://orcid.org/0000-0003-3163-5968>

Essossimna M. : <https://orcid.org/0009-0001-1997-6586>

Wouyo A. : <https://orcid.org/0000-0001-7041-918X>

Banlipo D. : <https://orcid.org/0009-0009-4277-9538>

Baholy R.R. : <https://orcid.org/0000-0002-8835-8335>

Marra D. : <https://orcid.org/0000-0002-6864-9039>

Komlan B. : <https://orcid.org/0000-0003-2781-3063>

Koffi A. : <https://orcid.org/0000-0003-4290-8861>

Références bibliographiques

Agbamaro Massama-Esso, K., Kanda Madjouma, P. H., Atakpama W., Dourma M., Akpagana K., & Batawila K. (2024). Gestion des adventices dans deux agroécosystèmes maraîchers au sud Togo : cas du cordon littoral et de la basse vallée de Zio. *Revue Écosystèmes et Paysages*, 4(2), 1-10.

Akoègninou, A., Van der Burg, W. J., & Van der Maesen, L. J. G. (2006). *Flore analytique du Bénin*. Backhuys Publishers.

Bigma, B., Woegan, Y. A., Koumantiga, D., Pereki, H., Dourma, M., Wala, K., & Akpagana, K. (2021). Cartographie et analyse diachronique des ceintures vertes villageoises de la préfecture de l'avé au Togo (Afrique de l'ouest). *Dynamiques environnementales. Journal international de géosciences et de l'environnement*, (48), 1-22.

Boudiar, R., Alshallash, K. S., Alharbi, K., Okasha, S. A., Fenni, M., Mekhlouf, A., & Mekhlouf, M. (2022). Influence of tillage and cropping systems on soil properties and crop performance under semi-arid conditions. *Sustainability*, 14(18), 11651.

Bouza, C. N., & Covarrubias, D. (2005). Estimación del índice de diversidad de Simpson en m sitios de muestreo. *Revista investigación operacional*, 26(2), 187-197.

Brunel, J. F., Hiepko, P., & Scholz, H. (1984). Flore analytique du Togo : phanérogames. *Englera*, (3), 3-751.

Chevallier, T., Razafimbelo, T., Chapuis-Lardy, L., & Brossard, M. (2020). Carbone des sols en Afrique. Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. Dans *Carbone des sols en Afrique. Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles*. IRD et FAO. <https://doi.org/10.4060/cb0403fr>

Chiti, T., Benilli, N., Mastrolonardo, G., & Certini, G. (2024). The potential for an old-growth forest

- to store carbon in the topsoil: A case study at Sasso Fratino, Italy. *Journal of Forest Research*, 35(1), 10.
- Courte, A., Cialdella, N., Muller, A., Blanfort, V., Bochu, J.-L., & Brossard, M. (2020). Recenser et évaluer les pratiques agricoles qui stockent le carbone des sols, premier pas vers une agriculture à faible impact en Guyane. *Cahiers Agricultures*, 29(1), 21. <https://doi.org/10.1051/cagri/2020019>
- Djangbedja, M., Kouya, A., Afla, A. K., & Tchamie, T. K. T. (2017). Analyse floristique et phytogéographique de la végétation de la basse vallée de Zio. *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, (3), 73–88.
- Dominik, C., Seppelt, R., Horgan, F. G., & Václavík, T. (2017). Regional-scale effects override the influence of fine-scale landscape heterogeneity on rice arthropod communities. *Ecological Monographs*, 87(2), 269–284. <https://doi.org/10.1002/ecm.1243>
- Ern, H. (1979). Die Vegetation Togo. Gliederrung, Gefährdung, Erhaltung. *Willdenowia*, 9, 295–312.
- Ghale, B., Mitra, E., & Sodhi, H. S. (2022). Carbon sequestration potential of agroforestry systems and its potential in climate change mitigation. *Water Air Soil Pollut*, 233, 228.
- Gnazou, M. D. T., Assogba, K., Sabi, B. E., & Bawa, L. M. (2015). Qualité physico-chimique et bactériologique des eaux utilisées dans les écoles de la préfecture de Zio (Togo). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 9(1), 504–516.
- Herrera, A. H., Ballera, B. L. G. B., Toro-Manríquez, M. D. R., Lencinas, M. V., Pastur, G. J. M., & Ramírez, H. H. (2021). Changes in vegetation of flooded savannas subject to cattle grazing and fire in plains of Colombia. *Land*, 10(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/LAND10020108>
- Hounkanrin, B. (2015). *Mise en valeur agricole de la vallée de l'Ouémé dans la Commune de Bonou : diagnostic et trajectoire* [Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi]. EDP/FLASH, UAC.
- Hutchinson, J., & Dalziel, J. M. (1963). *Flora of West Tropical Africa*, (Vol. 4). Millbank, London: Crown Agents for Oversea Governments and Administrations.
- Kanda, M., Badjana, H. M., Folega, F., Akpavi, S., Wala, K., Imbernon, J., & Akpagana, K. (2017). Dynamique centrifuge du maraîchage périurbain de Lomé (Togo) en réponse à la pression foncière. *Cahiers Agricultures*, 26(1). <https://doi.org/10.1051/cagri/2016054>
- Kanda, M., Djaneye-Boundjou, G., Wala, K., Gnandi, K., Batawila, K., Sanni, A., & Akpagana, K. (2013). Application des pesticides en agriculture maraîchère au Togo. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13(1), 1–17.
- Lal, R., Mokma, D., & Lowery, B. (2018). Relation between soil quality and erosion. In R. Ratta & R. Lal (Eds.), *Soil Quality and Soil Erosion* (pp. 237–258). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203739266>
- Lembaid, I., Moussadek, R., Mrabet, R., Douaik, A., & Bouhaouss, A. (2021). Modeling the effects of farming management practices on soil organic carbon stock under two tillage practices in a semi-arid region, Morocco. *Heliyon*, 7, e05889.
- Ménot, R. P., & Seddoh, K. F. (1985). The eclogites of the Lato hills, south Togo, West Africa: relics from the early tectonometamorphic evolution of the Pan-African orogeny. *Chemical Geology*, 50(1-3), 313–330.
- Murtagh, F., & Legendre, P. (2014). Ward's hierarchical agglomerative clustering method: Which algorithms implement Ward's criterion? *Journal of Classification*, 31(3), 274–295. <https://doi.org/10.1007/s00357-014-9161-z>
- RMT Florad. (2012). *Guide méthodologique de suivi de la flore adventice*. RMT Florad.
- Saidou, A. (2006). *Converging strategies by farmers and scientist to improve soil fertility and enhance crop production in Benin* [Thèse de doctorat, Wageningen University]. Wageningen.
- Yabi, I., Biau, F. Y., & Dadegnon, S. (2013). Diversité des espèces végétales au sein des agro-forêts à base d'anacardier dans la commune de Savalou au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 7(2), 696–706.
- Yao, S., & Kossi, A. (2023). Les grands défis de l'espace maritime du Togo. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 39(4), 1546–1556.
- Zheng, Q., Jiang, Z., Liu, J., Younas, M., Ullah, A., & Fang, J. (2024). Plant diversity and soil

characteristics in Changa Manga Forest, Pakistan:
Implications for conservation and restoration.
BMC Plant Biology, 24(1), Article 88.
<https://doi.org/10.1186/s12870-024-06012-5>.