

Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département d'Agroforesterie

Mémoire de Master

Spécialité: Aménagement et Gestion Durable des Ecosystèmes Forestiers et Agroforestiers
(AGDEFA)

Thème :

**MODÉLISATION DE LA CONTRIBUTION DE LA DIVERSITE
DES MICROORGANISMES A LA RECONSTITUTION DE LA
MATIERE ORGANIQUE DU SOL DES PAYSAGES POST-
FORESTIERS DE CÔTE D'IVOIRE**

Présentée et soutenue par :

Soda Mariane NDIAYE

Encadrants : Dr Ismaïla COLY, Maître de Conférences UFR-ST / UASZ

M. Anicet E. T. EBOU, Assistant, INP-HB/ Côte d'Ivoire

Dr Bruno HERAULT, Chercheur, CIRAD / France

Soutenu publiquement le 03 février 2023 devant le jury composé de :

Président :	M. Mohamed M. CHARAHABIL	Maître de conférences	UFR-ST / UASZ
Membres :	M. Aly DIALLO	Maître Assistant	UFR-ST / UASZ
	M. Joseph Saturnin DIEME	Maître Assistant	UFR-ST / UASZ
	M. Anicet E. T. EBOU	Assistant	INP-HB/ Côte d'Ivoire
	M. Bruno HERAULT	Chercheur	CIRAD / France
	M. Ismaïla COLY	Maître de Conférences	UFR-ST / UASZ

Année universitaire 2022-2023

DÉDICACES

À ma tendre et précieuse maman Anta SECK, source inépuisable d'inspiration et de soutien tout au long de ma vie. La femme battante qui m'a donné un encadrement solide, même après que papa soit passé à l'au-delà. Ton amour, ta patience, ta sagesse et tes prières ont été la lumière qui a guidé mes efforts. Ce mémoire est dédié à toi, en reconnaissance de tout ce que tu as fait pour moi. Merci pour ta présence inestimable dans ma vie.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de Master a été réalisé dans le cadre du projet MIDAS (Microbial Dynamics and Soil Organic Matter Recovery in Post-forest Landscaps) se concentrant sur la dynamique des communautés microbiennes du sol et leur relation avec la restauration de la matière organique dans un paysage post-forestier en Côte d'Ivoire. Le projet MIDAS est un projet porté par l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) et le CIRAD avec le soutien de la British Ecological Society. Il est également soutenu par le projet T4S qui bénéficie de l'appui financier du FFEM. Le projet MIDAS a pour objectif d'explorer la dynamique des microorganismes du sol pour étudier la récupération de la matière organique du sol et sa relation sur les paysages forestiers. Les objectifs spécifiques de ce projet sont : (i) d'étudier l'abondance et la diversité des micro-organismes liées à la récupération ou à la perte de matière organique du sol, (ii) évaluer la contribution des microorganismes à la restauration des forêts et la matière organique du sol et (iii) étudier les voies métaboliques associée à la perte ou la récupération de matière organique.

REMERCIEMENTS

Je commence par rendre grâce à Dieu de la manière la plus glorieuse. Je le remercie de ne pas m'avoir laissée seule dans un pays où tout m'était inconnu. Sa grâce a été ma boussole et a illuminé mon chemin à chaque étape, me donnant la force de persévérer et de surmonter les défis qui se sont dressés sur ma route. C'est grâce à sa miséricorde que j'ai pu accomplir ce travail. Je ne saurais également arriver à bon port sans mentionner l'appui d'un bon nombre de personnes qui ont apporté leur soutien scientifique, physique et moral, pour l'aboutissement de ce mémoire. Il s'agit en particulier de:

- Pr Mamadou BADJI, Recteur de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, pour l'environnement de travail créé lors de nos études;
- Dr Abdul-Kader Moussa DIABY, Directeur général de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), pour avoir accepté de nous accueillir dans son institut pour notre stage de fin d'études;
- Pr Ismaila COLY, Enseignant-Chercheur à l'Université Assane Seck de Ziguinchor, notre encadrant pédagogique, pour sa contribution cruciale à mon parcours universitaire, son soutien inestimable aussi bien pendant ma licence que mon master a façonné ma formation et m'a encouragé à atteindre de nouveaux sommets. Ses conseils, son expertise et son dévouement ont toujours été une grande source d'inspiration;
- M. Anicet E. T. EBOU, Enseignant-Chercheur à l'INP-HB, notre maître de stage et coordonnateur du projet MIDAS, pour sa vision, sa créativité et sa contribution remarquable à ce travail;
- Dr. Bruno HERAULT, Chercheur à l'INP-HB et au CIRAD, notre co-maître de stage, pour les cours, et l'assistance apportée durant tout ce stage;
- L'équipe du projet TERRI4SOL, en particulier, Dr. Raphaël AUSSÉNAC, Chercheur à l'INP-HB et au CIRAD, Dr. Evans EHOUMAN pour les démarches administratives, leurs conseils, leurs expertises partagées avec moi et surtout leur soutien continu, Dr. Bienvenu AMANI et Mme Blandine Ahou KOFFI pour les conseils et leur expertise.
- L'équipe du projet MIDAS, notamment mes collègues Samuel YAPO et Anicet TOURE pour les moments de travail, de partages continus autour de la recherche et les expériences de la culture Ivoirienne;

Le plus grand hommage que je puisse rendre à mes Professeurs est de dire qu'ils étaient mes guides tout au long de mon cursus scolaire. Par ces mots, je remercie vivement tous les Enseignants-Chercheurs du département d'Agroforesterie pour m'avoir formé et façonné. Il s'agit de Dr Djibril

SARR, chef de département, Pr Mohamed Mahmoud CHARAHABIL, Dr Antoine SAMBOU, Dr Boubacar CAMARA, Pr Ngor NDOUR, Pr Siré DIEDHIOU, Dr Joseph Saturnin DIEME, Dr Aly DIALLO, Dr Abdoulaye SOUMARE, Dr Saboury NDIAYE et Dr Oulimata DIATTA. Je tiens également à remercier tous les docteurs et doctorants du département. Je remercie aussi spécifiquement M. Benoît Aloïse B Manga qui a été la pierre angulaire en m'informant de l'appel à la candidature de ce projet et m'a soutenu pour l'obtention du poste. Un très grand merci à Nogaye NDIAYE, Oulimata KONATE, Ramatoulaye DIALLO, Abdoulaye DIOP, Meïssé FOFANA pour leur soutien inestimable.

J'aimerais remercier très particulièrement :

- Ma très chère mère, ma famille, mes frères et sœurs, qui ont toujours été là pour moi je veux nommer Fatou Bintou TALL, Mame Mbouso TALL, Aby NDIAYE, Zeyna NDIAYE, Souleymane SECK, Babacar NDIAYE, Aïssatou SECK, Salymata SECK, Pape Youssou NDIAYE et Pape Youssou SECK, pour leur soutien sans faille, leur amitié pure et leur amour inconditionnel. Je suis très fière de vous avoir comme famille.
- Souleymane BA, mon alter ego, cette personne exceptionnelle qui a occupé une place cruciale dans ma vie, un meilleur ami, un frère, qui m'a toujours soutenu, conseillé et épaulé dans toutes les circonstances de la vie surtout universitaire;
- Mes meilleures amies qui sont bien plus que des sœurs, Coumba Amadou DAFF, ayant partagé mon parcours depuis l'école primaire, une véritable amitié que je n'ai jamais eu l'occasion de connaître auparavant, et Dieynaba Wone, une vraie amie que je considère comme un précieux don d'Allah sur ma route.
- Mr Cheikh Mbao, Professeur de Mathématique au lycée de Thiénaba, pour son enseignement de qualité, son soutien sans cesse, son amitié et surtout ses précieux conseils.
- Dr Saliou NGOM Directeur de la protection des cultures et des végétaux de Dakar, un oncle, un mentor essentiel de mon développement professionnel. Il a facilité chacun de mes stages d'imprégnation, de ma première année de licence à mon Master 1. Ses précieux conseils et encouragements m'ont été aussi d'une aide inestimable. Mes derniers remerciements iront à l'endroit de mes très chères et fidèles amies « d'entre camarade Thienaba », de team Mariama Ba ainsi que mes chers camarades de classe de la 11^{ème} promotion Agro. Je suis reconnaissante d'avoir partagé cette aventure avec vous tous.

TABLE DES MATIÈRES

<i>DÉDICACES</i>	<i>i</i>
<i>AVANT-PROPOS</i>	<i>ii</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>iii</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>viii</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>ix</i>
<i>LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS</i>	<i>x</i>
<i>RÉSUMÉ</i>	<i>xi</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>xii</i>
<i>INTRODUCTION</i>	<i>1</i>
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1.1 Connaissance sur la matière organique du sol	3
1.1.1 Définition et composition de la matière organique du sol	3
1.1.2 Evolution de la matière organique dans le sol	4
1.1.3 Importance de la matière organique du sol.....	4
1.1.4 Teneurs du sol en carbone et en matière organique.....	5
1.2 Connaissance sur les communautés microbiennes du sol	6
1.2.1 Diversité et rôle des bactéries	6
1.2.2 Diversité et rôle des champignons	8
1.2.3 Diversité et rôle des archées	8
1.2.4 Estimation de la diversité des microorganismes.....	9
1.2.5 Les indices de diversité.....	9
1.3 Modèles et modélisation	10
1.3.1 Définition et intérêts de la modélisation	10
1.3.2 Modèle linéaire simple	11
1.3.3 Modèle linéaire multiple	11
1.3.4 Modèle additif.....	11
1.3.5 Modèle linéaire généralisé	12
1.3.6 Sélection de modèle	14

1.3.7	Comparaison de modèles avec l'AIC	15
1.3.8	Performance métrique du modèle	16
CHAPITRE 2: MATERIEL ET METHODES.....		17
2.1.	Présentation de la zone d'étude.....	17
2.2.	Matériel utilisé.....	19
2.2.1.	Matériel biologique.....	19
2.2.2.	Matériel technique.....	19
2.3.	Echantillonnage des sols.....	20
2.3.1.	Choix des parcelles.....	20
2.3.2.	Echantillonnage des sols.....	21
2.4.	Evaluation de la diversité des microorganismes.....	22
2.5.	Analyse des teneurs de carbone organique du sol.....	22
2.5.1.	Préparation des échantillons.....	23
2.5.2.	Détermination de la teneur en carbone organique du sol.....	23
2.6.	Analyses statistiques.....	25
2.6.1.	Analyse de l'impact des catégories d'âges des forêts sur la matière organique du sol et la diversité microbienne	25
2.6.2.	Modélisation de la relation entre la matière organique et la diversité microbienne	26
2.6.3.	Sélection de modèle	26
CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION.....		28
3.1	Résultats.....	28
3.1.1.	Dynamique de la matière organique du sol.....	28
3.1.2.	Diversité des microorganismes du sol selon les chronoséquences et les zones phytogéographiques.	31
3.1.3.	Modélisation.....	33
3.1.4.	Validation du modèle linéaire.....	33
3.1.5.	Modélisation de la restauration de la matière organique dans trois forêts suivant les différentes zones phytogéographiques en fonction de la diversité des microorganismes.....	36
3.2.	Discussion.....	39
3.2.1.	Dynamique de la matière organique du sol dans les zones phytogéographiques.	39

3.2.2.	Diversité des microorganismes selon les catégories d'âge des différentes zones phytogéographiques.	40
3.2.3.	Teneur en matière organique dans les zones post-forestières	39
3.2.4.	Modélisation de la reconstitution de la matière organique du sol dans les différentes forêts en fonction de la diversité des microorganismes.	40
	CONCLUSION	42
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Composition des matières organiques du sol.	3
Figure 2: Importance de la matière organique.	5
Figure 3: Démarche de sélection de modèle.	15
Figure 4: Carte bioclimatique de la Côte d'Ivoire et sites d'échantillonnage	17
Figure 5: Les outils d'échantillonnage. (A) : pelle, (B) : glacière, (C) : seaux, (D) : marteau, (E) : tarière, (F) : pioche, (G) : GPS.	19
Figure 6: Schéma du dispositif expérimental d'échantillonnage de sol	22
Figure 7: Préparation des échantillons de sol. (A) : Tamis, (B) : échantillon de sol étalé, (C) : échantillon de sol prêt à être analyser.	23
Figure 8: Matériels d'analyse de carbone du sol : (A) : Capsules d'étain, (B) : Balance électronique, (C) : Passeurs d'échantillons, (D) : Analyseur d'élément chimique CHNS de marque Thermo Fisher Scientific FLASH 2000 (USA), (F) : Bouteille de gaz d'Hélium (Phase gazeuse de transport des éléments chimiques) (G) : Logiciel Eager Xperience.	24
Figure 9: variation des taux de Matière organique du sol (MOS) selon les catégories d'âge dans les formations forestière de Niégre et Badenou.	28
Figure 10: variation du taux de matière organique du sol selon les catégories d'âge dans la forêt de Haut-Sassandra	29
Figure 11: variation du taux de matière organique du sol suivant les principaux usages du sol dans les différentes zones phytogéographique (forêts de Niégre, Badenou et Haut sassandra).30	
Figure 12: Diversité de Shannon des microorganismes suivant les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Niégé.	32
Figure 13: Diversité de Shannon des microorganismes suivant les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Haut_sassandra.	32
Figure 14: Diversité de Shannon des microorganismes dans les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Haut Sassandra.	33
Figure 15: Courbes d'évaluation de la linéarité entre la matière organique du sol (MOS) et la diversité microbienne (microdiv) des 3 zones phytogéographique.	34
Figure 16: Graphes de validation du modèle linéaire simple. (A) : les résidus standardisés par rapport aux valeurs ajustées ; (B) : histogramme des résidus ; (C) : normal Q-Q plot ; (D) : résidus en fonction de la diversité des microorganismes ; (E) : Boxplot des	35
Figure 17: Modèle additif généralisé expliquant la relation entre la diversité des microorganismes et le taux de matière organique pour chaque zone phytogéographique.	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Exemple de distribution de lois appartenant à la famille exponentielle	12
Tableau 2: Espérance et variance de certains modèles linéaires généralisés.....	13
Tableau 3: Fonctions de lien couramment utilisées.....	14
Tableau 4: Répartitions des parcelles prélevées par zone phytogéographie et classes d'âge ...	21
Tableau 5: Récapitulatif des différentes variables pour la modélisation	26
Tableau 6: Sélection de modèle avec l'AIC	36

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AIC : Akaike Information Criterion

AICc : Akaike Information Criterion corrigé

ANOVA : Analyse de la Variance

BNETD : Bureau National d'Études Techniques et de Développement

CIRAD: Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement

COS: Carbone Organique du Sol

CHNS : Carbone, Hydrogène, Azote et Soufre

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FFEM : Fonds Français pour l'Environnement Mondial

FS : Forêts Secondaires

GAM : Generalised Additive Model

GLM: Generalised Linear Model

ITPS : Intergovernmental Technical Panel on Soils

INP-HB : Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny

MIDAS : Microbial Dynamics and Soil Organic Matter Recovery

MOS : Matières Organiques du Sol

MVAD : Mission de Valorisation Agricole des Déchets

RMSE: Root-Mean-Square Error

UASZ : Université Assane Seck de Ziguinchor

UFR-ST : UFR Sciences et Technologies

RÉSUMÉ

Avant la déforestation, les sols étaient naturellement riches en matière organique. Cependant, après le défrichage pour l'agriculture, une perte considérable de matière organique a été observée dans les paysages post-forestiers de la Côte d'Ivoire. Ainsi, cette étude vise à évaluer la contribution des microorganismes à la reconstitution de la matière organique du sol dans les paysages post-forestier de la Côte d'Ivoire. Pour ce faire, une analyse de la diversité des microorganismes des sols de ces forêts a été effectuée et un modèle permettant de prédire la reconstitution de la matière organique du sol a été établi. Les résultats obtenus montrent que la forêt de Niégre, classée en zone ombrophile, affiche la plus haute teneur en matière organique, suivie de la zone mésophile (forêt de Haut Sassandra) et enfin de la zone soudanaise (forêt de Badenou). Les forêts anciennes présentent généralement des taux de matière organique du sol (MOS) plus élevés que les forêts secondaires, sauf dans la zone soudanaise où la forêt secondaire de catégorie d'âge [11-20 ans] a présenté un taux de matière organique du sol (3,43%) légèrement supérieur à celui de la forêt ancienne (3,22%). Le taux de matière organique du sol des différentes catégories d'âge dans les parcelles des forêts varie quelle que soit la zone phytogéographique. À Niégre, la catégorie [1-10 ans] affiche les taux de matière organique les plus élevés (4,86%). À Badenou, c'est la catégorie [30 ans < [qui présente le taux le plus élevé (2,82%). Pour ce qui est de Haut Sassandra, il n'y a pas de différence significative entre les catégories d'âge. La diversité microbienne des forêts ombrophiles, soudanaises et mésophiles augmente avec l'âge des forêts. Elle est plus grande avec les forêts primaires. Un modèle additif généralisé a été défini et traduit un effet significatif de la diversité des microorganismes sur la reconstitution de la matière organique des paysages post-forestiers. Ces résultats constituent une source d'informations utiles pour le maintien de l'équilibre écologique des écosystèmes forestiers et la régénération des sols dans les paysages post-forestiers de la Côte d' Ivoire.

Mots clés : Matière organique du sol, Microorganismes, Restauration, Modélisation et Zones phytogéographiques.

ABSTRACT

Before deforestation, soils were naturally rich in organic matter. However, after clearing for agriculture, a considerable loss of organic matter has been observed in post-forest landscapes in Côte d'Ivoire. Thus, this study aims to assess the contribution of microorganisms to the reconstitution of soil organic matter in post-forest landscapes of Côte d'Ivoire. To this end, an analysis of the diversity of soil microorganisms in these forests was carried out, and a model for predicting the reconstitution of soil organic matter was established. The results show that the Niégre forest, classified as an ombrophile zone, has the highest organic matter content, followed by the mesophile zone (Haut Sassandra forest) and finally the Sudan zone (Badenou forest). Old-growth forests generally had higher levels of soil organic matter (SOM) than secondary forests, except in the Sudan zone, where the secondary forest in the age category [11-20 years] had a slightly higher soil organic matter level (3.43%) than the old-growth forest (3.22%). The soil organic matter content of the different age categories in forest plots varies across all phytogeographical zones. In Niégre, the [1-10 years] category has the highest organic matter content (4.86%). In Badenou, the [30 years <] category has the highest rate (2.82%). In Haut Sassandra, there was no significant difference between age categories. Microbial diversity in rainforests, sudangrass and mesophilous forests increases with forest age. It is highest in primary forests. A generalized additive model was defined, reflecting a significant effect of the diversity of microorganisms on the reconstitution of organic matter in post-forest landscapes. These results provide useful information for maintaining the ecological balance of forest ecosystems and soil regeneration in post-forest landscapes in Côte d'Ivoire.

Key words: Soil organic matter, Microorganisms, Restoration, Modeling and Phytogeographical zones.

INTRODUCTION

Les forêts constituent une valeur vitale tant pour l'homme que pour son environnement écologique, elles jouent un rôle multiforme considérable dans la vie des populations et la dynamique des paysages et contribuent au maintien des processus écologiques. Elles disposent en effet, d'une source substantielle des ressources alimentaires, énergétiques, pharmacologiques pour toute la population (Manga, 2013). Cependant, au cours des dernières décennies, il a été constaté une augmentation considérable du taux de perte des forêts en Afrique (Masson, 2022). Cette perte est engendrée par la croissance exponentielle des populations humaines qui sont en quête perpétuelle de terres agricoles pour satisfaire leur besoin en consommation alimentaire.

En Côte d'Ivoire, le taux d'accroissement naturel est plus ou moins élevé avec une population qui est passé d'environ 3 millions en 1955 à plus de 25 millions de personnes en 2021 (RGPH-CI, 2021) accentuant ainsi les pertes de superficies forestières. En effet, les surfaces forestières sont progressivement converties en terres agricoles ou à d'autres formes d'utilisations des terres (FAO, 2020). Les surfaces forestières converties en terres agricoles sont utilisées essentiellement pour des cultures économiquement importantes telles que, le cacao, le café, le caoutchouc (Cotula et Vermeulen, 2009), le riz, l'huile de palme, l'hévéa et des plantations d'igname (Crafford et al., 2016). Cette expansion continue des terres agricoles issues de la déforestation a fortement dégradé le milieu forestier dans cette zone, provoquant ainsi des perturbations progressives des sols. Ces dernières ont entraîné des changements dans la teneur en matière organique, en Carbone et en Azote mais aussi des modifications de l'humidité du sol et des communautés microbiennes (Araújo et al., 2013; Mendes et al., 2015; Ferreira et al., 2016). Face à cette situation, la compréhension des processus de reconstitution des forêts en particulier de la matière organique du sol devient donc une priorité pour en déduire des itinéraires techniques pertinents de conservation et de restauration dans ces zones post-forestières. En effet, la compréhension de ces processus permettrait une meilleure définition des mécanismes inhérents à la régénération forestière et de la matière organique dans ces paysages ayant subi le défrichement en vue d'élaborer des stratégies adéquates pour la conservation et la restauration des massifs forestiers.

A l'état actuel de nos connaissances, il existe un nombre très limité d'études qui ont cherché à comprendre la dynamique des communautés microbiennes du sol et sa relation avec le rétablissement de la matière organique du sol dans les paysages post forestier de la Côte d'Ivoire. En effet, les études antérieures menées à ce sujet ont principalement porté sur les successions végétales, l'historique de l'utilisation des terres, la connectivité des zones forestières et les paramètres physico-

chimiques du sol (Amani et *al.*, 2021) excluant la composante microbienne. La littérature suggère de plus en plus que les communautés microbiennes du sol sont une clé de succès de la reforestation (Jiao et *al.*, 2022; McGee et *al.*, 2019). En effet, ces 20 dernières années, l'écologie microbienne du sol a subi une véritable révolution technologique dans sa façon de caractériser les communautés de microorganismes grâce à l'avènement des outils de biologie moléculaire (Ranjard et *al.*, 2017). Les avancées techniques et scientifiques des 10 dernières années ont permis d'acquérir des références sur l'abondance et la diversité des communautés microbiennes des sols (Horrigue et *al.*, 2016; Terrat et *al.*, 2022). L'enjeu aujourd'hui est de développer des modèles permettant de prédire le rétablissement des forêts ainsi que la restauration des stocks la matière organique du sol. Par conséquent, il est donc important d'explorer l'apport des communautés microbiennes à la reconstitution des forêts donc des matières organiques du sol en particulier dans le contexte ivoirien. C'est dans cette optique que s'inscrit notre étude qui repose sur l'hypothèse selon laquelle, la diversité des microorganismes du sol est fortement corrélé à sa teneur en matière organique et donc à sa fertilité. Cette hypothèse nous a conduit à la question de recherche suivante : Comment la diversité des microorganismes contribuent-elle à la reconstitution de la matière organique du sol ?

L'objectif général de cette étude est de mieux comprendre la contribution des microorganismes à la reconstitution de la matière organique du sol dans le paysage post-forestier de la Côte d'Ivoire.

La réalisation de cet objectif passe par l'atteinte d'objectifs spécifiques à savoir :

- évaluer la diversité des microorganismes du sol dans les paysages post-forestier en Côte d'Ivoire;
- construire un modèle permettant de comprendre l'influence de la diversité des microorganismes sur la restauration de la matière organique afin de prédire la possible évolution de cette matière organique du sol.

Le présent mémoire est reparti en trois chapitres, le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, le matériel et les méthodes utilisés sont présentés dans le deuxième chapitre et enfin le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leur discussion.

CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Connaissance sur la matière organique du sol

La matière organique est un constituant essentiel des sols. Elle lui confère des propriétés physiques en participant au maintien de sa structure. Elle constitue en outre une réserve d'éléments nutritifs ou énergétiques, disponibles pour les plantes et les animaux. Pour ces raisons, la matière organique des sols est considérée comme un indicateur important participant à la définition de la fertilité des sols (Traore, 2012) .

1.1.1 Définition et composition de la matière organique du sol

La matière organique du sol (MOS) décrit les constituants organiques du sol à différents états de décomposition, comme les tissus provenant de végétaux ou d'animaux morts, d'une taille de moins de 2 mm et les organismes du sol (FAO, 2017) . Elle représente en général 1 à 10 % de la masse des sols. La partie «humus» représente 80 à 90 % du total de la matière organique (CRA-LR, 2011).

La matière organique du sol peut être subdivisée en matière organique vivante, matières organiques fraîches et en composés organiques stabilisés (Figure 1).

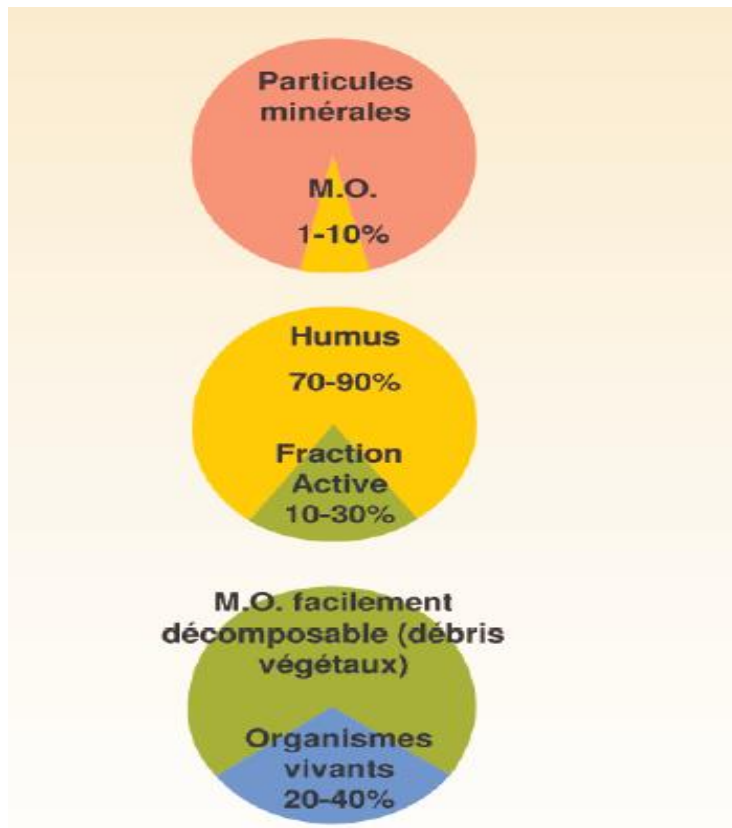


Figure 1: Composition des matières organiques du sol (Duparque et Rigalle, 2011).

1.1.2 Evolution de la matière organique dans le sol

Les MOS évoluent sous l'incidence de divers processus physiques, chimiques ou biologiques. Le processus physique correspond à la séquestration du carbone, qui est alors inaccessible par les microorganismes. Les transformations des matières organiques se réalisent essentiellement par les processus de recombinaison (Humification) et de dégradation (Minéralisation) (CRA-LR, 2011). L'humus est de la matière organique ayant subi une altération, appelée humification, poussée essentiellement par l'action combinée des animaux, des bactéries et des champignons du sol. Dans le sol, l'humus est la partie la plus active biologiquement (Huber et Schaub, 2011). Soltner (2017), le définit comme une substance nouvelle et complexe reconstruite à partir de certaines Matières Organiques transitoires et de certaines matières minérales. La formation des produits stables «formation de l'humus, ou humification», consiste en des recombinaisons et polymérisations de molécules organiques plus ou moins complexes (CRA-LR, 2011).

La minéralisation c'est le passage du monde organique au monde minéral. Ce processus se déroule en plusieurs étapes : la minéralisation primaire qui concerne les matières organiques jeunes et la minéralisation secondaire ou minéralisation des produits stables (communément appelé « minéralisation de l'humus »).

1.1.3 Importance de la matière organique du sol

Le sol contient un faible pourcentage massique de matière organique, généralement compris entre 1 et 5%. Cette petite quantité de matière organique, dont le carbone organique constitue à peu près la moitié, est très importante pour le fonctionnement du sol et de l'écosystème tout entier. La MOS joue un rôle critique dans la stabilisation de la structure du sol, la rétention et la libération de nutriments pour les végétaux et le maintien de la capacité de rétention des sols. Elle est ainsi un indicateur clé de la productivité agricole, mais aussi de la résilience environnementale (FAO, 2017).

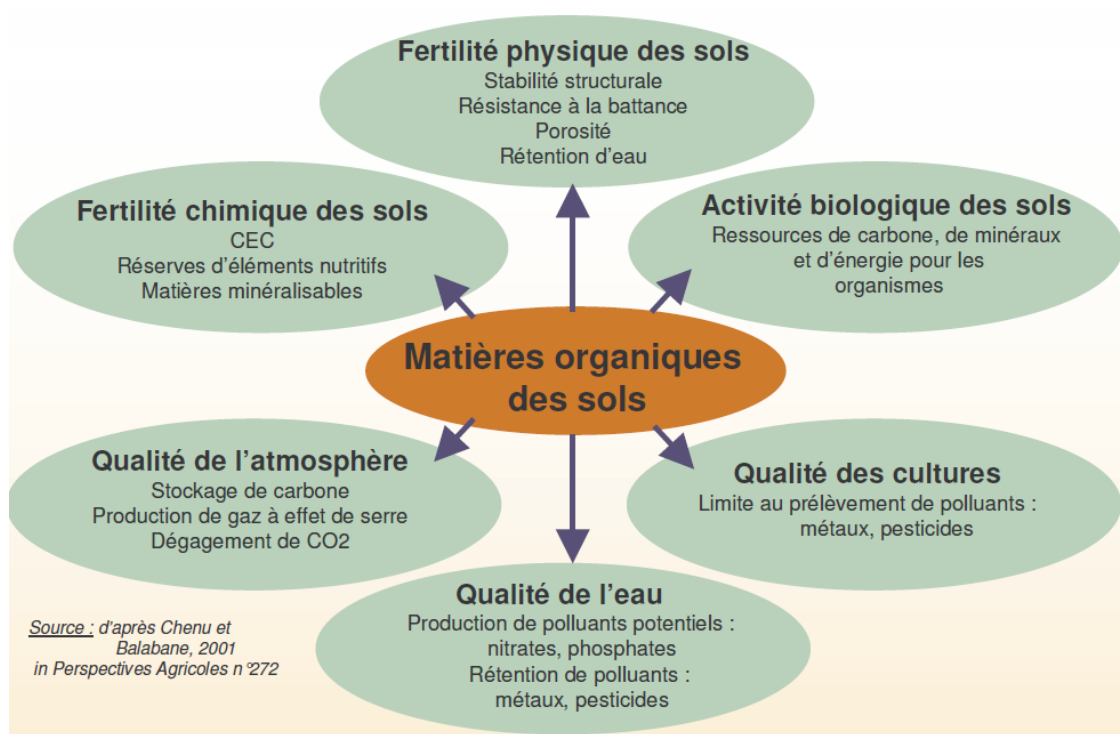


Figure 2: Importance de la matière organique (CRA-LR,2011).

Le taux de matière organique et/ou la teneur en carbone organique des sols sont ainsi considérés comme des indicateurs clés de la santé des sols, pour leurs fonctions agricoles et environnementales (FAO et ITPS, 2015). Maintenir un taux de matière organique dans les sols est donc bénéfique pour l'ensemble des services écosystémiques que procurent les sols à nos sociétés (Chevallier et *al.*, 2020). Le renouvellement de la MOS influence le fonctionnement des écosystèmes. La décomposition de la MOS libère des nutriments minéraux. Ces derniers deviennent disponibles et permettent ainsi la croissance des végétaux (Ndzai, 2020). Différents réservoirs de MOS peuvent être identifiés en fonction du temps nécessaire à sa pleine décomposition et au temps de permanence de ses produits dans le sol (temps de renouvellement) (Gougoulias et *al.*, 2014) :

- Le réservoir actif - renouvellement en quelques mois ou quelques années;
- Le réservoir passif - renouvellement pouvant atteindre le millier d'années.

1.1.4 Teneurs du sol en carbone et en matière organique

Il est assez facile de déterminer la teneur en carbone organique d'un sol ou d'une matière organique. Ces mesures, largement utilisées, ont été mises au point depuis longtemps. Pour calculer la teneur en matière organique du sol (MO %, ou g/100 g de sol sec), la teneur en carbone du sol (C %, ou g/100 g de sol sec) est multipliée par un coefficient de valeur 1,72 :

$$\%MOS = \%COS * 1,72$$

(Équation 1)

Le coefficient 1,72 correspond à la proportion moyenne de carbone dans la matière organique du sol (CIRAD et MVAD, 2006).

1.2 Connaissance sur les communautés microbiennes du sol

Le sol est l'un des principaux réservoirs de biodiversité, puisqu'il héberge environ un quart de la biodiversité (diversité taxonomique) totale de la planète (Jeffery et al., 2010). Plusieurs groupes et une grande diversité d'organismes vivent dans le sol : insectes, mollusques, protozoaires, algues, bactéries, champignons, etc. Les micro-organismes du sol sont extrêmement abondants et d'une grande diversité taxonomique et fonctionnelle. Ils comprennent des bactéries, des champignons, des micro-algues, des archées et des protistes (Bertrand et al., 2011).

Bien que les microorganismes représentent les organismes vivants les plus abondants et les plus diversifiés de notre planète, nos connaissances sur leur diversité ainsi que sur les processus de régulation associés sont limitées à ce jour. Ceci peut s'expliquer par les particularités des microorganismes comme i) leur petite taille, ii) leur faible accessibilité dans une matrice hétérogène et structurée comme le sol, et iii) leur forte densité (pour exemple 10^9 bactéries et 10^6 champignons par g de sol) et diversité (10^6 espèces bactériennes et 10^4 espèces de champignons par g de sol (Cuny et al., 2017)). Ce manque de connaissances est d'autant plus dommageable pour une matrice comme le sol car les microorganismes y sont fortement impliqués dans de nombreuses fonctions d'intérêts: dynamique des matières organiques et cycles du carbone et de l'azote, biodisponibilité des éléments nutritifs, dégradation de polluants organiques, rétention de polluants métalliques, action sur la structure des sols, etc (Maron et al., 2011).

1.2.1 Diversité et rôle des bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires sans véritable noyau (procaryotes), de forme sphérique, tubulaire ou hélicoïdale. Elles présentent une riche biodiversité et une forte densité quand elles colonisent le sol (Walser et al., 2021).

Dans les sols, il existe une diversité d'espèces de bactéries extrêmement forte de l'ordre d'un million d'espèces par gramme de sol. Elles peuvent être classées de plusieurs manières : sur la base de leurs caractéristiques (morphologie, métabolisme, ressources nutritives...), sur la base de leur génome ou par grandes catégories de fonctions. Elles sont également très abondantes dans les sols : 1 milliard d'individus par gramme de sol en moyenne (2,5 t/ha en équivalent carbone) (Riou et al., 2018).

Elles présentent une grande variété de formes et de tailles (majoritairement inférieures à $2 \mu\text{m}$). On estime qu'un gramme de sol renferme environ un milliard de bactéries et entre 2000 et 10000 espèces bactériennes selon leur état de santé (Roesch et al., 2007). Les études sur différents

sols (forêts, sols arides, agricoles *etc.*), ont permis d'identifier des séquences qui appartenaient aux Proteobacteria (40%), aux Acidobacteria (20%) et aux Actinobacteria (13%) (Janssen et Peter, 2006).

Les communautés bactériennes dans les sols forestiers sont des composantes importantes du fonctionnement de cet écosystème (Lladó et *al.*, 2017). Avec les champignons, ils participent à la décomposition de la matière organique et à la dégradation des substrats complexes, simples et solubles décrits (Buée et *al.*, 2009). De plus, les bactéries sont responsables de la fixation de l'azote (Reed et *al.*, 2011), des minéraux météorologiques (Colin et *al.*, 2017), de la mobilisation des nutriments (Nicolitch et *al.*, 2016) et de la production d'une grande variété de composés bioactifs (Aigle et *al.*, 2014; Uroz, et *al.*, 2009). Certaines bactéries sont bénéfiques aux plantes en agissant selon différents modes: (i) celles qui forment une relation symbiotique formant des structures spécialisées sur les racines des plantes hôtes (p. ex., nodules pour fixer l'azote) (Reed et *al.*, 2011), (ii) ceux qui colonisent les tissus internes de la plante sans être pathogènes (endophytes) (Ryan et *al.*, 2008), et (iii) ceux qui colonisent la rhizosphère (agrégats de sol directement reliés aux racines) et/ou le rhizoplane (surfaces des racines).

Bien que de nombreuses bactéries du sol puissent agir comme facteurs de croissance des plantes, les souches bactériennes appartenant à la même espèce n'ont pas toutes des capacités métaboliques identiques (Antony-Babu et *al.*, 2017). C'est par leurs fonctions de minéralisation (minéralisation de la matière organique, oxydo-réduction de composés inorganiques, solubilisation ou précipitation de minéraux, transformation de composés organiques plus ou moins récalcitrants), que les bactéries jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement des sols (Gobat et *al.*, 2010). Elles sont ainsi à la base de la régulation des principaux cycles biogéochimiques des sols et elles sont généralement capables de :

- réduire les sulfates en sulfites et sulfides (bactéries sulfato-réductrices) ;
- oxyder le soufre (*Thiobacillus* par exemple) ;
- fixer l'azote atmosphérique (diazotrophie seule ou en symbiose avec des plantes) ;
- produire des nitrates (bactéries nitrifiantes) ;
- rendre disponible le phosphore (par la phosphatase alcaline par exemple).

De plus, certaines bactéries, notamment celles dites PGPR (Plant Growth Promoting *Rhizobacteria*, des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes), ont la capacité de développer des symbioses avec les plantes, qui leur permettent d'augmenter la mise à disposition d'éléments nutritifs pour leur croissance.

Les bactéries peuvent également favoriser la dépollution des sols contaminés par des métaux lourds (on parle d'éléments traces métalliques) (Ahemad, 2019) en modifiant leur disponibilité mais

interviennent surtout dans la dépollution des composés organiques tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques en les minéralisant au moins partiellement.

1.2.2 Diversité et rôle des champignons

Les communautés fongiques sont très bien étudiées dans les sols forestiers (Buée et *al.*, 2009). Les champignons peuvent se développer sous deux formes distinctes : comme cellules planctoniques individuelles (levures) et comme structures hyphales (champignons filamenteux) (Van der Wal et *al.*, 2013). Ce dernier permet l'exploration des sols en répandant et en recouvrant les pores du sol et en pénétrant les matériaux solides et les tissus végétaux (De Boer et *al.*, 2005). De plus, la forme hyphale permet aux champignons de transférer les nutriments dans les sols épuisés, ce qui a un impact majeur sur la croissance des arbres (De Boer et *al.*, 2005). La grande diversité des champignons a conduit à les classer en groupes taxonomiques (Tedersoo et *al.*, 2014), tels que *les Chytridiomycota*, *les Glomeromycota*, *les Basidiomycota*, *les Ascomycota*, *mucoromycota* (anciennement *zygomycota*). Avec respectivement 56%, 31% et 10%, ces trois derniers groupes représentent la quasi-totalité de la communauté fongique du sol symbiotique avec les racines (Danielsen et *al.*, 2012).

Pour des raisons pratiques, les champignons peuvent également être classés selon leur mode d'alimentation dans le sol: saprophyte, mycorhizien, endophyte et pathogène (Toju et *al.*, 2016).

Les champignons ont des modes de vie différents. Par exemple, les champignons saprophytes servent de décomposeurs de substrats récalcitrants (Buée et *al.*, 2009) à l'aide d'enzymes extracellulaires hydrolytiques et oxydatives (Crowther et *al.*, 2015). Les champignons pathogènes se nourrissent d'organismes vivants, endommagent et finissent par tuer l'hôte (Bonfante et Genre, 2010). D'autres champignons, les champignons endophytes, colonisent l'intérieur des structures végétales (feuilles, tiges, racines) en tant que micro-organismes neutres, commensaux ou bénéfiques. Enfin, les champignons mycorhiziens créent une relation symbiotique avec les racines (Danielsen et *al.*, 2012). Les champignons saprophytes se nourrissent de matières organiques mortes (MOM) déjà plus ou moins décomposées ou dégradées par d'autres organismes. Ces MOM leur fournissent les éléments nutritifs qui sont prédigérés grâce à l'excrétion d'enzymes extracellulaires fongiques. Les saprophytes représentent, en nombre estimé d'organismes, environ 44 % de la communauté fongique, avec une faible variation entre les différents types d'écosystèmes (Tedersoo et *al.*, 2014).

1.2.3 Diversité et rôle des archées

Parmi les micro-organismes qui habitent les sols, le domaine *Archaea* est particulièrement important parce qu'il est abondant et joue des rôles importants dans le cycle C et N (Schimel, 2004). Ce domaine constitue l'un des trois principaux lignages évolutifs de la vie sur Terre, et bien qu'on croie depuis longtemps que ces organismes vivent principalement dans des environnements

extrêmes, les études précédentes ont démontré qu'ils sont largement répartis dans le monde entier dans différents types de sols (Siles et Margesin, 2016; Catão et al., 2013). Les nouveaux outils ont élargi la distribution écologique et la diversité des archées bien au-delà des attentes, dévoilant une distribution étendue et une diversité inattendue (Chaban et al., 2006; Auguet et al., 2010). La plupart des membres d'Archaea appartiennent aux deux phyla principales *Euryarchaeota* et *Crenarchaeota*. D'autres nouvelles phyla ont été proposées ces dernières années, par exemple *Nanoarchaeota*, *hyperthermophile Nanoarchaeum equitans* (Huber et al., 2002) et *Thaumarchaeota* (Brochier et al., 2008). Au niveau du sol, les archées remplissent de nombreuses fonctions communes aux bactéries (décomposition, minéralisation, création de biofilms, etc...) (Pruvost, 2018). Avec l'avancée de la classification *Archaea*, leur rôle fonctionnel dans l'écosystème a également fait l'objet d'études récentes. Ils jouent des rôles importants dans le cycle carbone et de l'azote (Schimel, 2004). En effet, Les *Archaea* effectuent de nombreuses étapes du cycle de l'azote, comme la respiration à base de nitrate et la dénitrification (Cabello et Roldán, 2004).

1.2.4 Estimation de la diversité des microorganismes

La diversité biologique a été classiquement estimée à trois niveaux emboîtés, nommés la diversité alpha (α), beta (β) et gamma (γ) par Whittaker en 1972. La diversité totale dans une région donnée (diversité gamma) a été définie à l'aide de deux éléments; la diversité évaluée à une échelle plus locale (diversité alpha) ainsi que les différences de diversité locales au sein de la région globale (diversité beta) (Lalande, 2013).

La diversité alpha représente la diversité présente localement, mesurée à l'intérieur d'un système délimité et peut être observée sous forme de richesse spécifique et/ou d'abondance au sein d'une communauté d'organismes (Catão et al., 2013). La diversité α est donc la moyenne des diversités des communautés (Marcon, 2018).

1.2.5 Les indices de diversité

Les indices de diversité, parfois appelés mesures d'hétérogénéité, résument les informations contenues dans la distribution de l'abondance des espèces en une seule statistique. Ces indices sont des paramètres qui sont fréquemment utilisés pour obtenir des informations sur l'état de communautés végétales ou animales, leur viabilité ou leur évolution dans le temps par exemple. Ils permettent également d'apprécier la diversité qui peut exister entre des zones ou des milieux différents. Il existe de nombreux indices de biodiversité en écologie microbienne. Parmi tous ces indices, on retrouve dans plusieurs articles la richesse spécifique, l'hétérogénéité de Shannon, Simpson et la réciproque de Simpson pour mesurer la richesse taxonomique (Delgado-Baquerizo et al., 2016).

- Diversité de Shannon (H')

L'indice de Shannon Weaver (H') qui considère à la fois l'abondance et la richesse spécifique, est utilisé pour apprécier la distribution des individus suivant les espèces. Il est compris entre 0 et 4,5. L'indice est minimum quand tous les individus appartiennent à la même espèce. Il est maximal quand chaque individu représente une espèce distincte (Frontier et Pichod-Viale, 1995). L'indice de Shannon se calcule de la façon suivante :

$$H' = -\sum p_i * \log p_i \quad (\text{Équation 2})$$

Où : p_i = abondance proportionnelle ou pourcentage d'importance de l'espèce : $p_i = n_i/N$; n_i = nombre d'individus d'une espèce dans l'échantillon ; N = nombre total d'individus de toutes les espèces dans l'échantillon.

1.3 Modèles et modélisation

1.3.1 Définition et intérêts de la modélisation

Un modèle statistique est un ensemble d'hypothèses sur la distribution de probabilité qui a généré certaines données observées. Les modèles sont essentiels en écologie parce que les systèmes écologiques sont souvent trop vastes et trop lents pour que les hypothèses puissent être testées par des expériences dont les échelles temporelles et spatiales seraient pertinentes (Tredennick et *al.*, 2021). En effet, la compréhension des liens d'interdépendance entre les structures, les processus et le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que les services écosystémiques, nécessite des modèles mécanistes pour explorer les relations entre la biodiversité et les processus écologiques (Díaz et *al.*, 2007). De ce fait, la modélisation s'est imposée au fur des années dans la communauté scientifique et en particulier en écologie comme une approche privilégiée pour appréhender et décrire les phénomènes complexes qui nous entourent, en fournissant une représentation simplifiée mais significative de la réalité (Tredennick et *al.*, 2017).

Les modèles "réponse-effet" suggèrent une modélisation des relations entre les facteurs environnementaux, les processus écologiques et les services écosystémiques en se basant sur les liens de causalité existant entre les facteurs environnementaux et les caractéristiques de réponse, ainsi qu'entre ces caractéristiques de réponse et ces processus (Lavorel et Garnier 2002). Néanmoins, les modèles peuvent rencontrer des défis liés à l'échelle d'application et parfois présenter des limites dues aux services écosystémiques, lesquels peuvent être parfois complexes ou très indirects. Cependant, les conclusions dépendent de la structure du modèle et des hypothèses qui ont guidé sa conceptualisation. Il est donc essentiel d'exercer la prudence nécessaire lors de l'interprétation des résultats (Cordonnier et *al.*, 2016).

1.3.2 Modèle linéaire simple

Le but du modèle linéaire simple est d'expliquer une variable Y à l'aide d'une variable X . La variable Y est appelée variable dépendante, ou variable à expliquer et la variables X est appelée variable indépendante, ou variables explicatives. Nous appliquons cette équation générale aux n observations de Y et aux valeurs correspondantes de X . Le modèle est écrit sous la forme suivante :

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \text{ et } \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{Équation 3})$$

Pour chaque individu i , la variable aléatoire ε_i représente l'erreur commise, c'est-à-dire l'écart entre la valeur de Y_i observée et la valeur $\alpha + \beta X_i$ donnée par la relation linéaire. Dans le modèle, les variables ε_i ne sont pas observées et les coefficients β_i et α ne sont pas connus. Pour étudier le modèle, on pose donc des conditions sur les erreurs. On supposera que les erreurs sont des variables indépendantes, de même loi, centrées et de même variance (que l'on notera σ^2 , condition d'homoscédasticité qu'il faudra vérifier).

1.3.3 Modèle linéaire multiple

Le modèle de régression multiple est une généralisation du modèle de régression simple lorsque les variables explicatives sont en nombre fini. Nous supposons donc que les données collectées suivent le modèle suivant :

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \beta_3 X_{i3} + \dots + \beta_n X_{in} + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \quad (\text{Équation 4})$$

Dans une régression multiple, il se peut que le nombre de variables disponibles soit grand. Cette quantité d'informations est parfois superflue ou redondante. Ainsi la diminution du nombre de variables pour n'en retenir que celles réellement intéressantes dans la régression est envisageable. Généralement, soit on part du modèle complet et on retire des variables (sélection de variable par la méthode backward), soit on part d'une régression simple et on ajoute des variables qui enrichissent le modèle (sélection de variable par la méthode forward). Dans ces deux cas, on arrête d'enlever ou d'ajouter une variable au modèle en analysant la statistique F de Fisher.

1.3.4 Modèle additif

Le modèle de régression linéaire utilisant seulement une variable explicative est donné par l'équation 3. Dans ce modèle, la relation entre les Y_i et les X_i est résumé par des polynômes de degrés 1 ou des polynômes de degré supérieurs ou égaux à 2 ne violant pas la linéarité de la relation. Cependant, la relation entre la variable dépendante et la variable indépendante peut ne pas être linéaire. On est donc amené dans de tels cas à utiliser des fonctions de lissage, noté $s(X_i)$ permettant de mieux capturer la relation. Ce type de modèles fait partie des modèles additifs généralisés. La formule générale d'un tel modèle est :

$$Y_i = \alpha + s(X_i) + \varepsilon_i, i = 1, \dots, n \text{ et } \varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (\text{Équation 5})$$

- **Splines de lissage**

Les splines de lissage sont formées en combinant des fonctions simples pour approximer des formes fonctionnelles non-linéaires complexes.

1.3.5 Modèle linéaire généralisé

Les modèles linéaires généralisés développés par Nelder et Wedderburn en 1972 constituent une généralisation de la régression linéaire. Ils permettent d'étudier la relation entre une variable dépendante et un ensemble de variables explicatives en utilisant une distribution de la variable dépendante différente de la loi normale (Malika et Chikhi, 2012). Les modèles linéaires généralisés ont 3 composantes :

- La variable de réponse Y , à laquelle est associée une loi de probabilité. C'est la composante aléatoire, appartenant généralement à la famille naturelle des exponentielles qui peut être représenté par la formule générale :

$$f(y; \theta, \phi) = e^{\frac{y \times \theta - b(\theta)}{a(\phi)} + c(y, \theta)} \quad (\text{Équation 6})$$

Où ϕ est le paramètre de dispersion, θ le paramètre canonique, et a , b et c sont des fonctions connues et spécifiées selon la loi exponentielle en question (Normale, Gamma, Poisson, binomiale, etc.) (Tableau 1).

Tableau 1: Exemple de distribution de lois appartenant à la famille exponentielle

Distribution	$\theta(\mu)$	$b(\theta)$	$a(\phi)$
Normale ($N(\mu, \sigma^2)$)	μ	$\theta^2/2$	σ^2
Bernoulli ($B(\mu, 1)$)	$\log \frac{\mu}{1-\mu}$	$\log(1+ e^\theta)$	1
Poisson ($P(\mu)$)	$\log(\mu)$	e^θ	1
Gamma ($\Gamma(\mu, v)$)	$1/\mu$	$-\log(-\theta)$	$1/v^2$

On a par ailleurs, en utilisant les dérivées première et seconde de la fonction de densité de l'équation précédente les expressions de l'espérance (E) et de la variance (Var) de Y:

$$E(Y) = b'(\theta) \quad (\text{Equation 6.1})$$

$$\text{var}(Y) = b''(\theta) \times a(\phi) \quad (\text{Equation 6.2})$$

- Les variables explicatives $X_1 \dots X_n$ utilisées comme prédicteurs dans le modèle définissent sous forme d'une combinaison linéaire $\eta = \beta X$, la composante déterministe (Tableau 2).

Tableau 2: Espérance et variance de certains modèles linéaires généralisés

Distribution	E(Y)	Var(Y)
Normale ($N(\mu, \sigma^2)$)	$\mu = \theta$	σ^2
Bernoulli ($B(\mu, 1)$)	$\mu = \frac{e^\theta}{1 + e^\theta}$	$\mu(1 - \mu)$
Poisson ($P(\mu)$)	$\mu = e^\theta$	μ
Gamma ($\Gamma(\mu, \nu)$)	$\mu = -\frac{1}{\theta}$	$\frac{\mu^2}{\nu}$

• La

fonction de lien décrit la relation fonctionnelle entre la combinaison linéaire des variables ($X_1 \dots X_n$) et l'espérance mathématique de la variable de réponse Y.

Une fonction de lien fait correspondre une relation non linéaire à une relation linéaire en transformant les modalités de la variable dépendante. La forme générale de la fonction de lien g est :

$$g(\mu_i) = X_i \beta \quad (\text{Équation 7})$$

Où $g(\mu_i)$ est la fonction de lien, μ_i est la réponse moyenne de la i-ème observation, X_i le vecteur des variables prédictives pour la i-ème ligne et β le vecteur des coefficients associés aux variables explicatives.

Il existe de nombreuses fonctions de lien couramment utilisées et leur choix est guidé par plusieurs considérations (Tableau 3).

Tableau 3: Fonctions de lien couramment utilisées

Distribution	Nom du lien	Fonction de lien, $X\beta = g(\mu)$	Fonction de la moyenne
Normale	Identité	$X\beta = \mu$	$\mu = X\beta$
Bernoulli	Logit	$X\beta = \ln\left(\frac{\mu}{1-\mu}\right)$	$\mu = \frac{1}{1 + e^{-X\beta}}$
Poisson	Log	$X\beta = \ln(\mu)$	$\mu = e^{X\beta}$
Gamma	Inverse négatif	$X\beta = -\mu^{-1}$	$\mu = -(X\beta)^{-1}$

1.3.6 Sélection de modèle

Comme pour toute analyse, avant de commencer la régression linéaire, nous appliquons une exploration des données en mettant l'accent sur les points suivants :

- Les valeurs aberrantes dans la variable de réponse et les variables explicatives ;
- La colinéarité des variables explicatives ;
- Les relations entre la variable de réponse et les variables explicatives.

Les résultats de ces trois étapes doivent nous guider sur la manière de procéder avec l'analyse de suivi, par exemple, une analyse de régression linéaire ou un modèle additif. Cela indique également si une transformation des données est nécessaire.

Un modèle linéaire a été réalisé puis une validation de ce modèle. La validation d'un modèle consiste à la vérification de toute une série d'hypothèses sur l'intercept α et la pente β , notamment la normalité, l'homogénéité, la valeur déterministe de la variable dépendante, l'indépendance et la spécification correcte du modèle. L'acceptabilité ou non des conditions d'application du modèle peut être évalué graphiquement ou numériquement. Nous optons pour la seconde méthode qui consiste à :

- Tracer les résidus (standardisés) par rapport aux valeurs ajustées pour évaluer l'homogénéité ;
- Faire un histogramme des résidus pour vérifier la normalité. Il est possible également d'utiliser un QQ-plot ;
- Tracer les résidus par rapport à chaque variable explicative qui a été utilisée dans le modèle. Si vous observez un motif, vous violez l'hypothèse d'indépendance ;
- Tracer les résidus par rapport à chaque variable explicative non utilisée dans le modèle. Si vous observez un motif, incluez la variable explicative omise et réajustez le modèle. Si les motifs de résidus disparaissent, incluez le terme, même s'il n'est pas significatif et

- Évaluer le modèle pour les observations influentes. Un outil utile est la fonction de distance de Cook. Les résultats de la validation du modèle linéaire, nous offrent deux options :
- soit le modèle est validé et considéré comme le modèle adéquat ;
- soit il est rejeté et on opte pour d'autres modèles en fonction du type de la variable dépendante.
- Si le modèle linéaire est rejeté, nous avons le choix entre les différents modèles linéaires généralisés et un modèle généralisé additif.

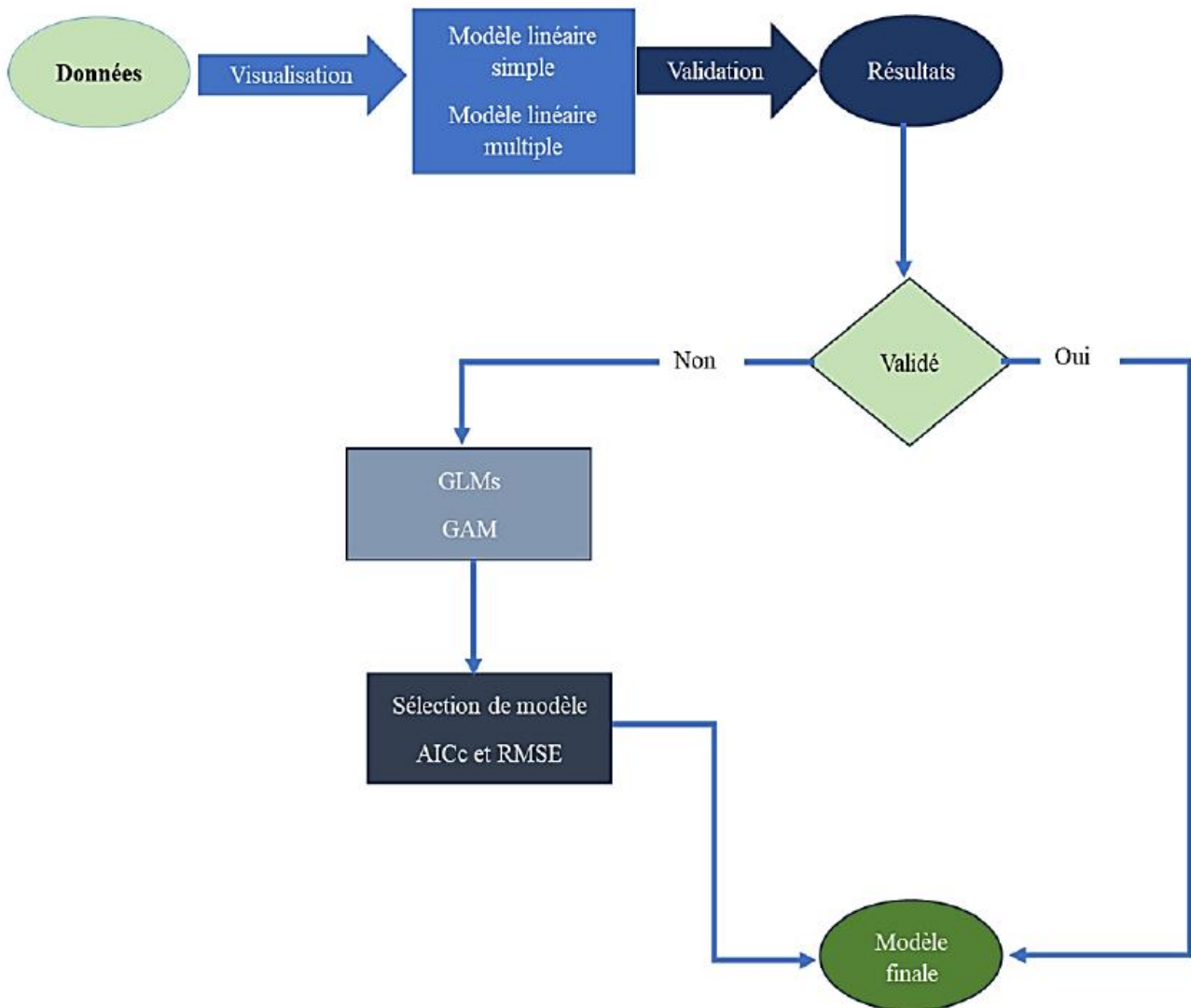


Figure 3: Démarche de sélection de modèle

1.3.7 Comparaison de modèles avec l'AIC

Le critère d'information d'Akaike (AIC), proposé par Hirotugu Akaike en 1973, permet de comparer l'ajustement de différents modèles. L'AIC est défini comme suit:

$$AIC = -2 \log(l) + 2K \quad (\text{Équation 8})$$

Où l est la fonction de vraisemblance (*likelihood*) et K est le nombre de paramètres estimés par le modèle. Selon ce critère, le meilleur modèle est celui qui a le plus petit AIC.

1.3.8 Performance métrique du modèle

Sur la base de l'erreur de prédiction, le calcul de deux mesures de la qualité du modèle est illustré. Ce sont le coefficient de détermination (R^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE).

Le coefficient de détermination représente l'efficacité du modèle, ou la quantité de variance expliquée. Le R^2 quantifie la fraction de la variation des données qui est expliquée par le modèle de prédiction (Amani, 2023). Il mesure l'amélioration de la prévision du modèle par rapport à la moyenne de l'ensemble de données comme prédicteur et est défini par l'équation suivante (Krause et al., 2005).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \tilde{\theta}_i)}{\sum_{i=1}^n (P_i - \tilde{\theta}_i)} \quad (\text{Équation 9})$$

Le RMSE peut être interprétée comme la différence +/- moyenne prévue entre une valeur prédite et la valeur réelle. Il s'agit de l'écart type des résidus (la différence entre la valeur observée et la valeur prédite d'une caractéristique) autrement dit que c'est une mesure qui évalue la précision d'un modèle de régression en quantifiant l'écart entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs réelles observées dans les données. Cette mesure est calculée en prenant la racine carrée de la moyenne des carrés des différences entre les valeurs prédites et les valeurs réelles.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \theta_i)^2}{n}} \quad (\text{Équation 10})$$

P_i : La valeur prédite de la variable

θ_i : La valeur mesurée (observée) de l'attribut sur le terrain,

n : Le nombre total d'observation,

i : L'observation

$\tilde{\theta}$: la moyenne des observations (Amani, 2023)

CHAPITRE 2: MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

L'étude est réalisée dans les 3 zones bioclimatiques de la Côte d'Ivoire suivant un gradient de végétation : les forêts sempervirentes se trouvent dans la zone ombrophile, forêts semi-décidues dans la zone mésophile et les forêts sèches ouvertes dans la zone soudanienne. Ce gradient correspond à un gradient annuel de précipitations qui varie entre 2500 mm au sud et 1100 mm au nord. La température annuelle moyenne est d'environ 26,5 C mais avec des variations de températures quotidiennes et saisonnières beaucoup plus importantes au nord qu'au sud. Les forêts étudiées sont : la forêt classée de Badénou dans la zone soudanaise, la forêt classée du Haut-Sassandra dans la partie mésophile et la forêt classée de Niégré en zone ombrophile (Figure 4).

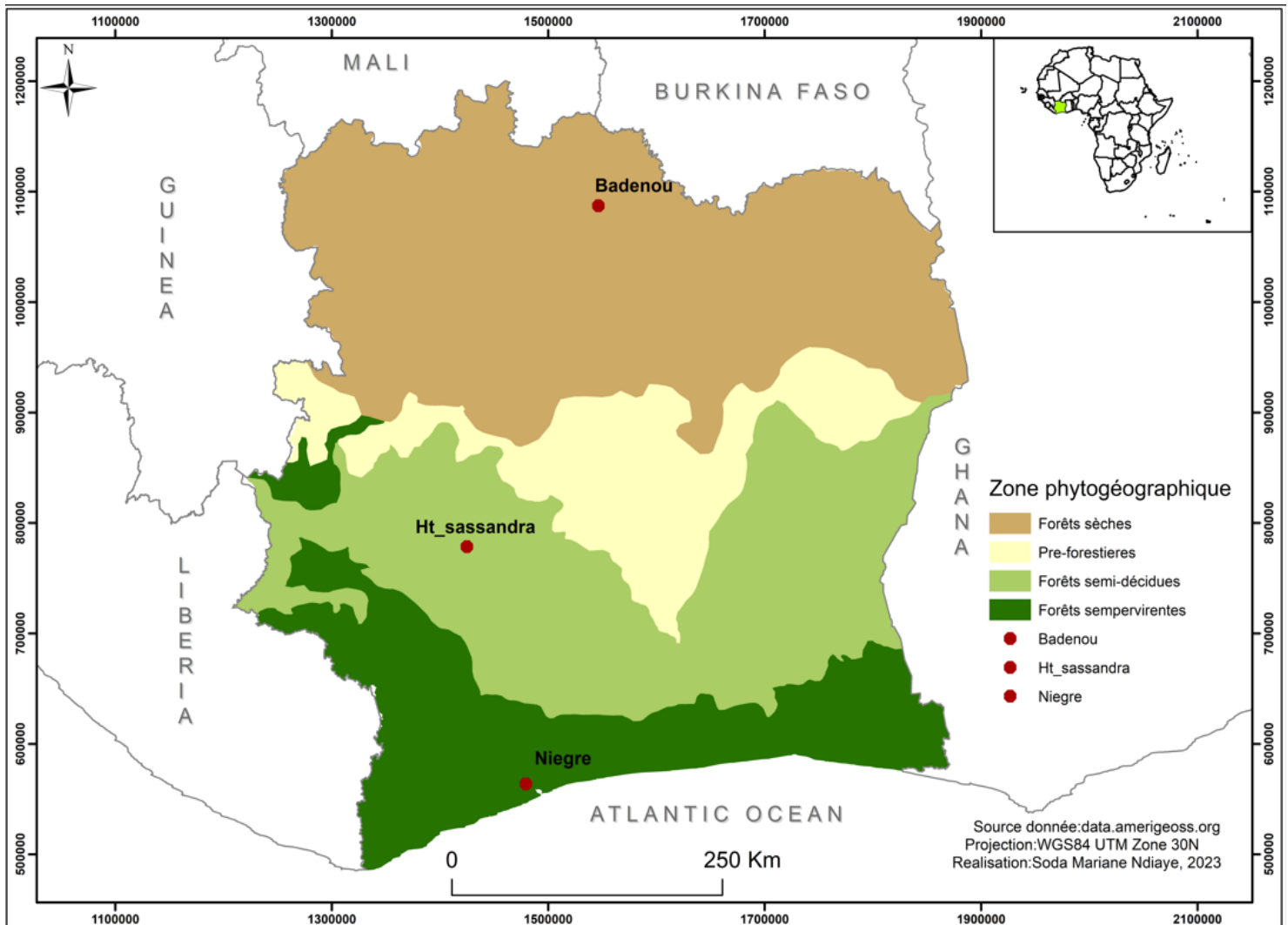


Figure 4: Carte bioclimatique de la Côte d'Ivoire et sites d'échantillonnage

La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'ouest, dans la zone intertropicale, entre les latitudes 4°30' et 10°30' Nord et les longitudes 8°30' et 2°30' Ouest. Elle couvre une superficie de 322,500 Km² et est limitée au Sud par l'océan Atlantique, au Nord par le Mali et le Burkina Faso, à l'Est par le Ghana et, à l'Ouest, par le Libéria et la Guinée.

Le nord présente un climat de type soudanais avec une pluviométrie comprise entre 1000 et 1700 mm et deux saisons dont une pluvieuse et une sèche avec un taux d'humidité de 40 à 50 % et marquée par le vent de l'harmattan (Konaté and Kampmann, 2010). Les températures moyennes annuelles sont voisines de 27° C (Gboze et al., 2020). C'est un milieu où le relief est dominé par les plateaux, d'où émergent certaines collines (Sangare et al., 2009) .

Il dispose d'un réseau hydrographique caractérisé par l'affluent du Bandama. Le réseau hydrographique comprend des cours d'eau permanents et des cours d'eau temporaires.

Les sols sont généralement de type ferrallitique moyennement et faiblement désaturés, ou encore remaniés gravillonnaires. Ce sont des sols typiques profonds et ferrugineux tropicaux, qui ont des caractéristiques spécifiques en fonction de leur localisation géographique et de leur formation géologique (Assa et Koné, 2009).

Le nord de la Côte d'Ivoire est constitué d'une végétation clairsemée. La forêt classée de Badénou est située à cheval du département de M'bengué, du département de Ouangolodougou et du département de Korhogo, dans la région administrative du Poro (Sangare, A., Koffi, E. and Akamou, 2009). Elle couvre une superficie de 26 980 hectares avec pour coordonnées géographiques 5° 32' 06" et 5° 49' 67" longitude ouest et 9° 41' 63" et 9° 51' 63" latitude nord (Yaokokore Beibro et al., 2011).

Le centre de la Côte d'Ivoire est caractérisé par une pluviométrie moyenne comprise entre 1500 et 2200 mm et un taux d'humidité de 60 à 70 % (Konaté & Kampmann, 2010).

Le relief est peu accidenté avec des altitudes variantes entre 130 m et 550 m (Touré, 2017). Du point de vue de la végétation, cette zone appartient au secteur mésophile du domaine soudano-guinéen. Elle représente une transition entre la zone guinéenne au Sud et la zone soudanaise au Nord, et est constituée de forêts semi-décidues autrefois riches en essences de bois précieux, notamment le Samba (*Triplochiton scleroxylon*), le Bété (*Mansonia altissima*), le Kotibe (*Nesogordonia papaverifera*) et le Bassam acajou (*Khaya ivorensis*) (Bloom & Reenen, 2013). On retrouve dans cette zone la forêt classée du Haut-Sassandra, située dans le département de Daloa dans la région administrative du Haut-Sassandra. Elle s'étend sur une superficie de 102 400 hectares (Oszwald et al., 2003) . Ses coordonnées géographiques sont entre 6° 58' et 7° 22' de longitude ouest et entre 6° 50' et 7° 22' de latitude nord.

La zone sud de la Côte d'Ivoire comprend des forêts denses humides sempervirentes (Kouamé et Zoro Bi, 2010). Du point de vue climatique, cette zone correspond aux foyers de fortes précipitations (1300 et 2500mm de pluies par an) (Konaté et Kampmann, 2010). Les sols sont de type ferrallitique désaturé (Kouamé et Zoro Bi, 2010). Cette zone comporte la forêt classée de Niégré. Elle se situe à cheval sur les régions du Gbôklè (72 %) et de la Nawa (28 %), respectivement dans les départements de Sassandra et Guéyo. Elle s'étend sur une superficie de 92 500 hectares. Ses coordonnées géographiques sont entre 5° 20' et 6° 30' longitude ouest et 4° 50' et 5° 50' latitude nord. La majorité des forêts de toutes ces zones, a subi une très forte pression anthropique, avec une déforestation suivie d'une conversion des clairières en cultures intensives, depuis les années 1970 (N'Dja and Decocq 2007; Kattge et al., 2020). Aujourd'hui, les terres jadis cultivées sont, pour la plupart, en jachère.

2.2. Matériel utilisé

2.2.1. Matériel biologique

Le matériel biologique est constitué des échantillons de sols provenant des forêts classées du Haut-Sassandra, Badénou et Niégré.

2.2.2. Matériel technique

Le matériel utilisé pour la collecte des échantillons de sol est constitué d'un GPS pour localiser les parcelles, d'une tarière et des seaux pour le prélèvement des échantillons de sol, de sacs en plastique pour stocker les échantillons et d'une glacière pour la conservation des échantillons sur le terrain.



Figure 5: Les outils d'échantillonnage. (A) : pelle, (B) : glacière, (C) : seaux, (D) : marteau, (E) : tarière, (F) : pioche, (G) : GPS.

2.3. Echantillonnage des sols

2.3.1. Choix des parcelles

Le protocole utilisé pour le choix des parcelles et des zones phytogéographiques est celui de Amani et *al.* (2022). Les forêts classées ont été choisies pour tenir compte des différentes zones phytogéographiques et climatiques de la Côte d'Ivoire. Après investigations, des parcelles de relevés dans des unités de végétation floristiquement homogènes et représentatives de la zone ont été installées de façon aléatoire. Les informations concernant l'histoire des parcelles ont été recueillies par enquête auprès des paysans vivant à proximité des forêts et des agents du ministère des Eaux et Forêts en charge de la gestion et de la protection de ces forêts. Un total de 3 chronoséquences a été mis en place suivant les trois zones phytogéographiques. Ainsi, dans chacune d'elle, le plan d'échantillonnage se présente comme suit :

- des parcelles de relevés dans des reliques de forêts primaires ;
- des parcelles de forêts secondaires (FS) dont l'âge depuis l'abandon des cultures a permis de définir 4 catégories à savoir , des FS de [0 -10 ans] correspondant aux très jeunes jachères, des FS de [11-20 ans] correspondant aux jeunes jachères, des FS de [21-30 ans] correspondant aux vieilles jachères et des FS de plus de 30 ans correspondant aux très vieilles jachères.

Au total, 61 parcelles dont 20 pour chacune des forêts classées de Niégré et Haut-Sassandra et 21 pour la forêt de Badénou ont été installées dans les trois forêts classées correspondant aux trois zones phytogéographiques (Tableau 4).

Tableau 4: Répartitions des parcelles prélevées par zone phytogéographie et classes d'âge

Forêts	Classe d'âge des forêts secondaire	Parcelles	
		Nombre	Superficie (ha)
Ombrophile : Niégré	FS (Très jeunes jachères) de [0 -10 ans]	6	1,2
	FS (Jeunes jachères) de [11-20 ans]	6	1,2
	FS (Vieilles jachères)de [21-30 ans]	2	0,4
	FS(Très vieilles jachères) de [> 30 ans]	2	0,4
	Forêts primaires	4	0,8
Mésophile : Haut- Sassandra	FS (Très jeunes jachères) de [< 10 ans]	4	0,8
	FS (Jeunes jachères)de [11-20 ans]	4	0,8
	FS (Vieilles jachères)de [21-30 ans]	4	0,8
	FS(Très vieilles jachères) de [> 30 ans]	4	0,8
	Forêts primaires	4	0,8
Soudanaise : Badénou	FS (Très jeunes jachères) de [< 10 ans]	4	0,8
	FS (Jeunes jachères) de [11-20 ans]	4	0,8
	FS (Vieilles jachères) de [21-30 ans]	4	0,8
	FS(Très vieilles jachères) de [> 30 ans]	4	0,8
	Forêts primaires	5	1

2.3.2. Echantillonnage des sols

Pour tenir compte de la micro-hétérogénéité spatiale, chaque parcelle de 2000 m² (100 m x 20 m) a été subdivisée en deux sous-parcelles de 1000 m². Sur chaque sous-parcelle, 4 sous-échantillons ont été prélevés à une profondeur de 10 cm et mélangés pour former 1 échantillon composite. L'échantillon prélevé est alors étiqueté et conservé dans la glacière réfrigérée. Au total quarante (40) échantillons de sols sont prélevés sur chaque chronoséquence de 20 parcelles.

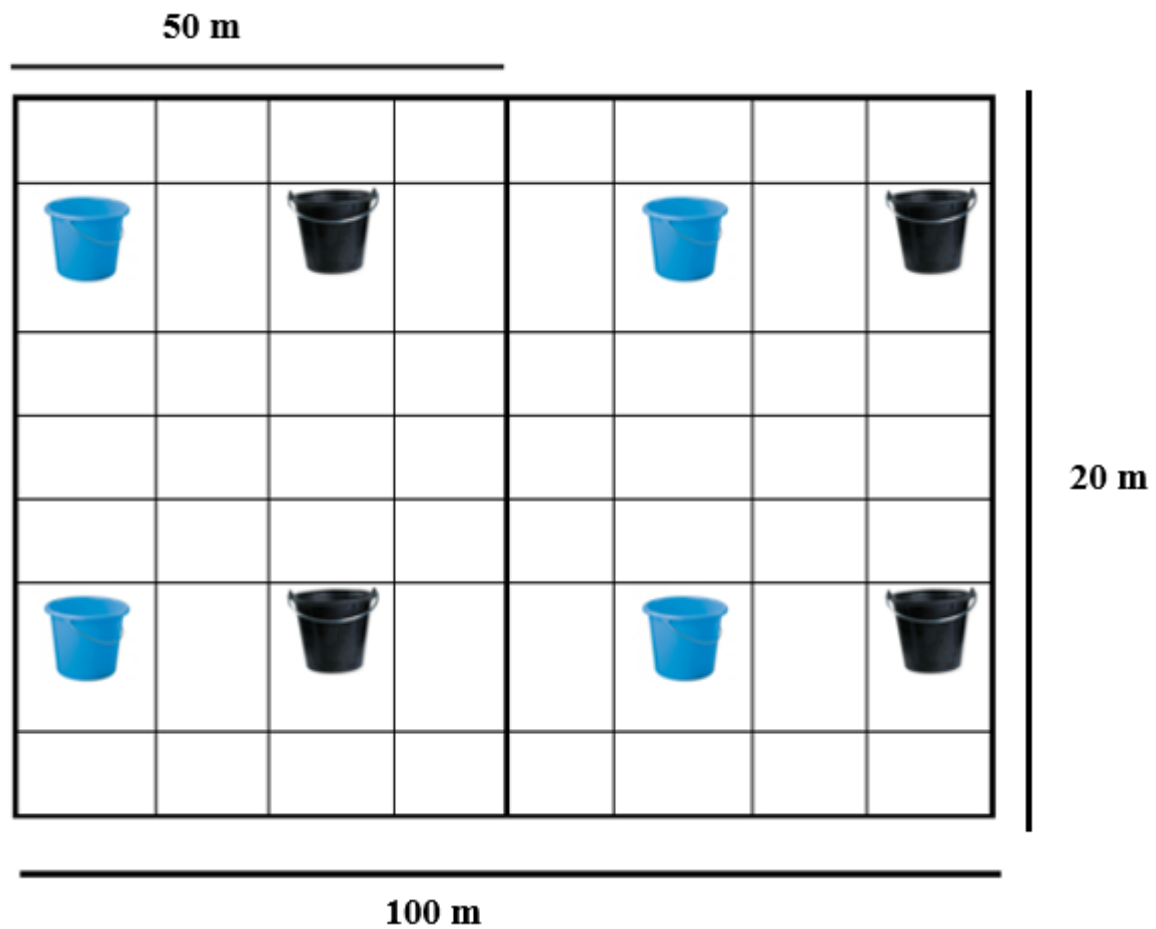


Figure 6: Schéma du dispositif expérimental d'échantillonnage de sol

2.4. Evaluation de la diversité des microorganismes

En raison des retards dans la livraison du matériel nécessaire à l'analyse moléculaire, les activités de laboratoire concernant l'identification moléculaire des microbiotes, qui devrait faire suite aux prélèvements des échantillons de sol, n'ont pu être menées dans les délais initialement prévus. En conséquence, un ensemble de données sur les microorganismes a été généré à l'aide du package miaSim à travers le modèle de simulation généralisé de Lotka-Volterra (Generalized Lotka-Volterra GLV).

2.5. Analyse des teneurs de carbone organique du sol

Après collecte des échantillons de sols, ceux-ci ont été expédiés au laboratoire de pédologie de l'INP-HB pour la détermination du taux de carbone.

2.5.1. Préparation des échantillons

La première étape de la préparation des échantillons consiste à les sécher entre une et deux semaines dans la salle de séchage maintenue à une température ambiante autour de 25°C. Après séchage et retrait manuel des débris végétaux et animaux, les échantillons ont été séparés en fraction fine (particules < 2mm) et fraction grossière (> 2mm). Les deux types de fractions ont ensuite été pesés : la fraction grossière a été pesée directement à l'aide d'une balance de précision 10⁻² mg et la fraction fine par retrait de la masse de la fraction grossière à la masse de l'échantillon avant séparation. Un sous-échantillon de 10g de fraction fine de chaque échantillon a été prélevé pour la détermination du carbone organique du sol

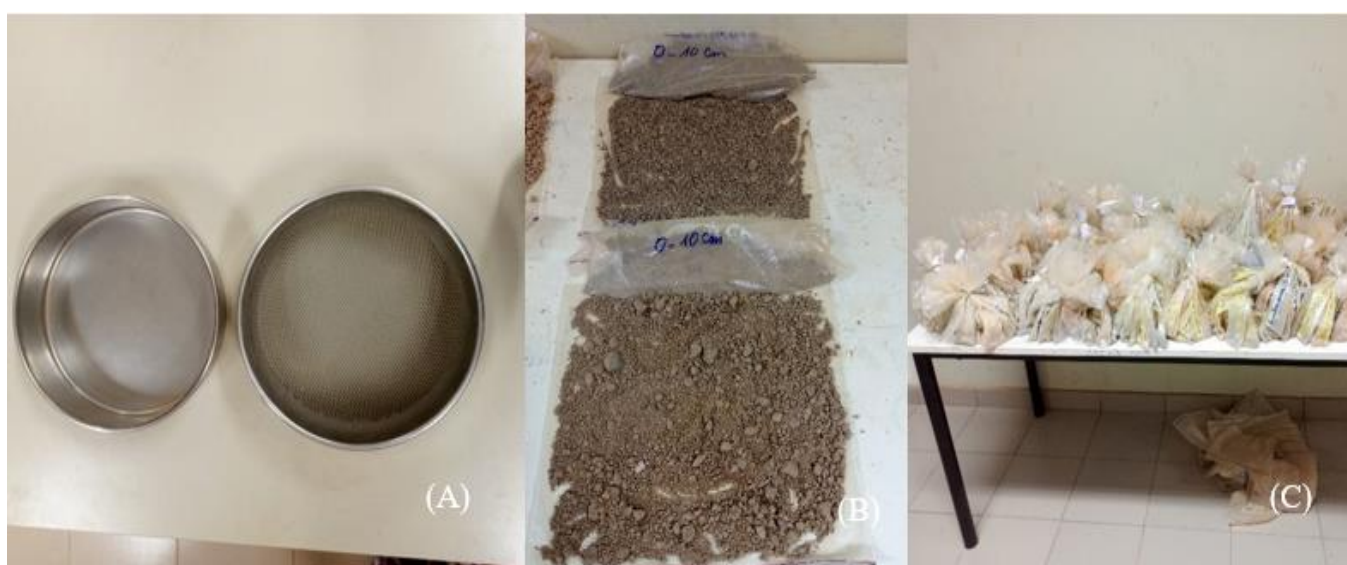


Figure 7: Préparation des échantillons de sol. (A) : Tamis, (B) : échantillon de sol étalé, (C) : échantillon de sol prêt à être analysé.

2.5.2. Détermination de la teneur en carbone organique du sol

La teneur en carbone organique a été évaluée par la méthode de combustion FLASH (Méthode Dumas) implémentée dans l'analyseur CHNS permettant la mesure simultanée des éléments azote, carbone, hydrogène et soufre (FLASH 2000 NC Soil Analyzer, Thermo Fisher Scientific, États-Unis). Une quantité de 10g de sol broyé à 0,25 mm (soit 40 mg de sol) est utilisée pour chaque échantillon. Avant le début de l'analyse, une calibration de l'appareil est effectuée à l'aide de deux échantillons de sol de référence, de deux blancs (nacelles vides) et de cinq standards. L'analyse commence par l'introduction d'un échantillon dans le tube de combustion qui est ensuite soumis à une température de 930°C dans un flux gazeux contenant de l'oxygène. Le carbone présent dans l'échantillon est alors oxydé sous forme de dioxyde de carbone. Une phase de réduction est alors

effectuée à l'aide d'une colonne de séparation et la détection des éléments constitutifs à l'aide d'un catharomètre. L'acquisition des résultats s'effectue via le logiciel EAGER Xperience (Version 1.2) de l'analyseur FLASH.

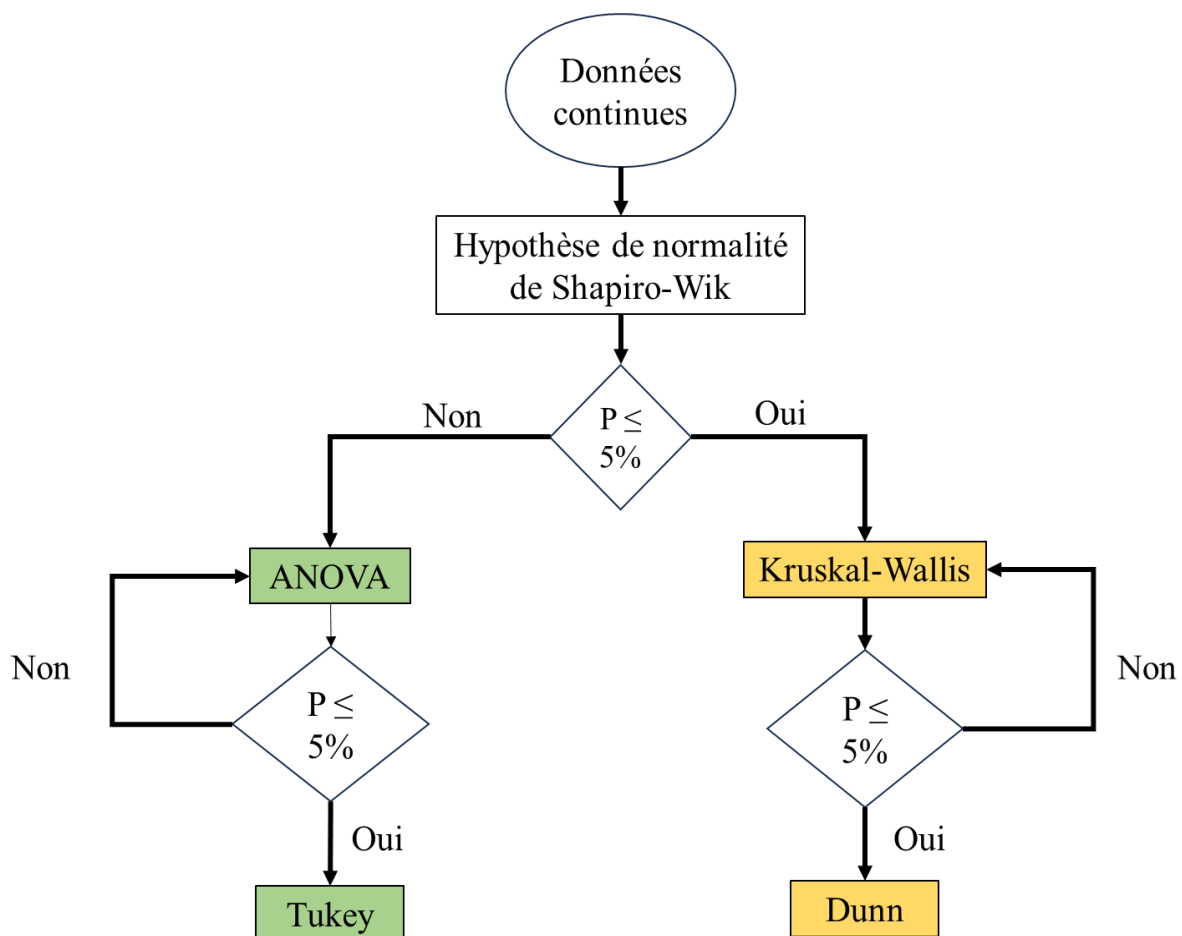


Figure 8: Matériels d'analyse de carbone du sol : (A) : Capsules d'étain, (B) : Balance électronique, (C) : Passeurs d'échantillons, (D) : Analyseur d'élément chimique CHNS de marque Thermo Fisher Scientific FLASH 2000 (USA), (F) : Bouteille de gaz d'Hélium (Phase gazeuse de transport des éléments chimiques) (G) : Logiciel Eager Xperience.

2.6. Analyses statistiques

2.6.1. Analyse de l'impact des catégories d'âges des forêts sur la matière organique du sol et la diversité microbienne

Toutes les analyses de données ont été effectuées, les modèles testés ont été écrits et les figures ont été créées avec R (R Core Team, 2023). L'analyse de la significativité des différences entre les moyennes de la matière organique du sol et de la diversité microbienne selon l'âge des parcelles et le type de forêt a été faite grâce à des analyses de variance, soit par un test d'ANOVA, soit par un test de Kruskal-Wallis. Tout d'abord, le test de Shapiro-Wilk a été effectué pour déterminer la normalité de toutes les données. Si la P-value est inférieure à un certain seuil (généralement 0,05), les données sont considérées comme non normalement distribuées et c'est le test d'ANOVA qui est appliquée. Si la P-value est supérieure à 0,05%, Si les données ne sont pas distribuées de façon normale, le test de Kruskal-Wallis, qui est l'alternative non paramétrique de l'ANOVA est appliquée. En fonction de la significativité du résultat obtenu, un test post-hoc avec pour but d'identifier les groupes significativement différents a été entrepris. Un test de Tukey dans le cas d'une ANOVA ou un test de Dunn dans le cas d'un test de Kruskal-Wallis ont été effectués. Le seuil de 5% a été utilisé pour tous les tests effectués.



2.6.2. Modélisation de la relation entre la matière organique et la diversité microbienne

Pour mieux appréhender les communautés microbiennes du sol et leur contribution à la restauration de la matière organique dans les paysages post-forestiers en Côte d'Ivoire, la relation entre différentes variables d'intérêt a été étudiée.

Les variables utilisées pour la modélisation comprennent le taux de matière organique, la diversité microbienne, les zones phytogéographiques et les catégories d'âges des forêts. Un récapitulatif de ces variables est présenté dans le Tableau 4.

Tableau 5: Récapitulatif des différentes variables pour la modélisation

Variabes	Description	Abréviation	Type
Matière organique du sol	Taux de matière organique du sol	MOS	Variable réponse quantitative continue
Zone phytogéographique	Les différentes zones phytogéographiques des forêts.	Zone_phyto	Variable explicative qualitative nominale
Catégorie d'âge	Catégories d'âge des forêts	Categorie	Variable explicative qualitative nominale
Diversité microbienne	Diversité alpha (indice de Shannon) des microorganismes	microdiv	Variable explicative continue

2.6.3. Sélection de modèle

Pour explorer les liens entre le taux de la matière organique du sol et la diversité des microorganismes dans les différentes zones phytogéographiques, nous avons procédé par une sélection de modèle. Pour chaque modèle, la variable prédite (variable de réponse) est le taux de la matière organique (%), la variable explicative est la diversité microbienne (indiquée par l'indice de Shannon) et les catégories d'âge et les zones phytogéographiques sont utilisées comme facteur de l'effet testé. Plusieurs modèles ont été considérés, il s'agit notamment d'un modèle linéaire multiple (LM), un modèle d'additivité généralisée (GAM) avec différentes spécifications de lissage pour la diversité microbienne, et le modèle linéaire généralisé (GLM). Pour les deux derniers modèles différentes distributions (gaussienne, gamma) avec des fonctions de lien (log et inverse) ont été testés. La réalisation des modèles et des graphes s'est faite sur le logiciel statistique R (v.4.3.0) (R Core Team, 2022).

Le modèle testé est alors défini par l'équation suivante:

$$MOS_{ij} = \alpha + \beta_1 microdiv_{ij} + \beta_2 Zone_phyto_{ij} \times \beta_3 Categorie_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Équation 11})$$

$$\text{Avec } \varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$$

Où, MOS_{ij} : Taux de matière organique des forêts,

α : L'intercepte ou l'ordonnée à l'origine du modèle

β_1 , β_2 et β_3 les effets aléatoires respectifs des microorganismes et de l'interaction entre les zones phytogéographiques et les catégories d'âges

$microdiv_i$: Diversité des microorganismes,

$Zone_phyto_{ij}$: Zone phytogéographique de la forêt,

$Categorie_{ij}$: Catégorie d'âge de la forêt,

ε_i : Résidus,

σ^2 : La variance constante,

$\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$: Résidus ou *terme d'erreur centré sur 0 et à variance constante* σ^2

- **Choix des distributions**

Le choix de la distribution est un choix à priori. Si la variable de réponse est une variable continue, la distribution normale est la meilleure option mais la distribution gamma peut être un choix alternatif (Zuur et *al.*, 2019). Nos données de Matière organique (variable réponse) étant continues, alors la distribution normale a été choisie en premier lieu pour tous les modèles puis la distribution gamma pour le modèle linéaire généralisé (GLM) et le modèle d'additivité généralisé (GAM).

CHAPITRE 3: RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Résultats

3.1.1. Dynamique de la matière organique du sol

○ Suivant les catégories d'âge et le type de forêt

La figure 9 représente les taux de matière organique du sol (MOS) de différentes catégories d'âge dans les forêts de Badenou et Niégré. Les résultats montrent que quelle que soit la zone phytogéographique, le taux de la MOS varie en fonction des différentes catégories d'âge.

Pour les figures 9.1 et 9.2, les résultats du test de Kruskal montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les catégories d'âge respectivement pour les forêts de Niégré (p -value = 0,46) et Badenou (p -value = 0,4). Toutefois, en valeur absolue l'analyse de ces résultats montre que :

- dans la forêt de Niégré, la catégorie [1-10 ans] présente le taux de matière organique le plus élevé (4,86%). En revanche, la catégorie [11-20 ans] présente le taux le plus bas avec 3,11%. Entre ces extrêmes, la catégorie [21-30 ans] montre des pourcentages intermédiaires en MOS (4,62%) (Figure 9.1).
- dans la forêt de Badenou, la catégorie [30 ans <] a donné le taux de matière organique le plus élevé (2,82%) comparée aux autres catégories, tandis que la forêt primaire (foretanc) a montré un taux similaire à celui de la catégorie [1-10 ans] mais avec une plus grande dispersion des valeurs dans la forêt primaire (foretanc). La catégorie [21-30 ans] a montré un taux intermédiaire en MOS (1,55%) (Figure 9.2).

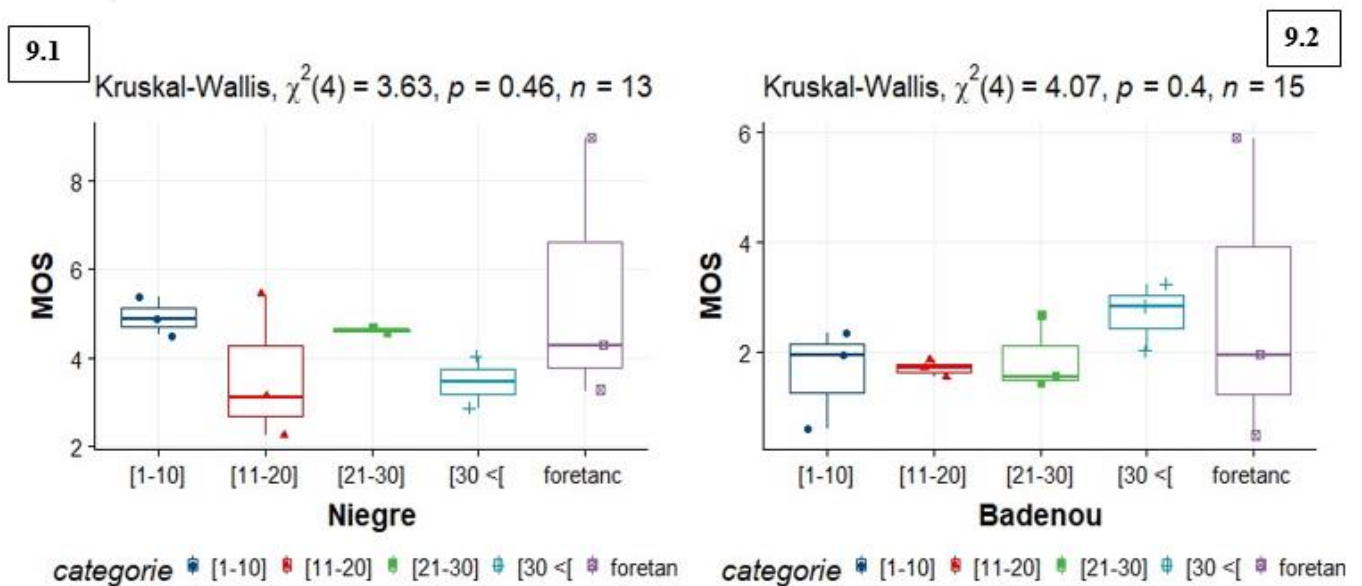


Figure 9: variation des taux de Matière organique du sol (MOS) selon les catégories d'âge dans les formations forestières de Niégré et Badenou.

La figure 10 représente les taux moyens de matière organique du sol (MOS) de différentes catégories d'âge de la forêt classée Haut_Sassandra. L'analyse de la variance (ANOVA) n'a pas révélé de différence significative (p -value = 0,941) entre les catégories d'âge. Toutefois en valeur absolue, il existe en valeur absolue une variabilité du taux de MOS entre les catégories d'âge. La catégorie [11-20 ans] présente le taux de MOS le plus élevé (3,43%) par rapport aux autres catégories. Tandis que la catégorie [1-10 ans] indique le plus faible taux de MOS (3,22%).

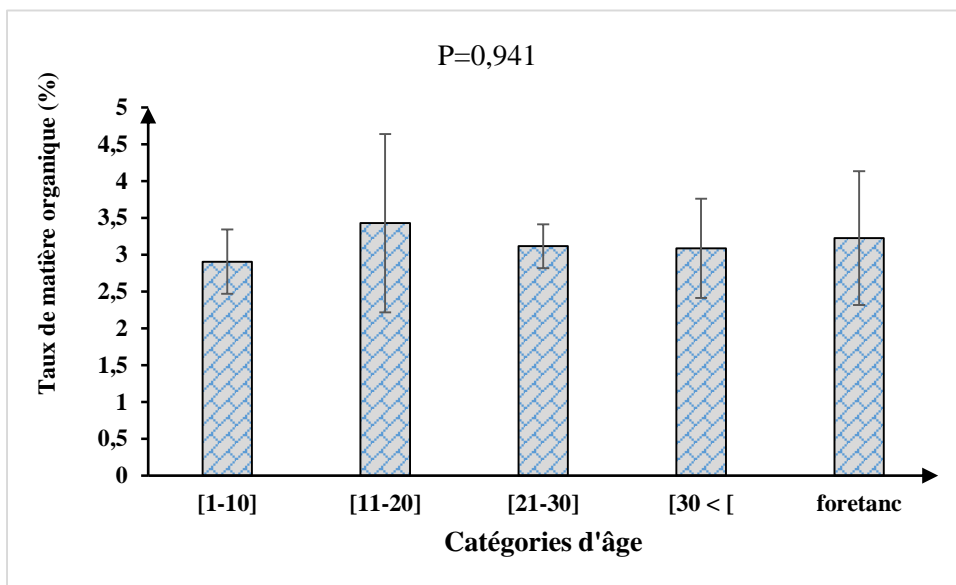


Figure 10: variation du taux de matière organique du sol selon les catégories d'âge dans la forêt de Haut-Sassandra

○ **Selon les principaux usages des sols et les types de forêts**

Les figures ci-dessous montrent la variation du taux de matière organique du sol selon les usages des sols après reconversion des forêts de Niegre, haut sassandra et Badenou. Il apparait à travers ces figures que la distribution de la matière organique suivant les types d'usages des sols change d'une zone phytogéographique à l'autre. Néanmoins, certaines cultures notamment cacao et les cultures vivrières sont représentées dans toutes les forêts. Ces résultats révèlent aussi que le taux de matière organique est plus important dans les forêts primaires à Niegre (9,5%) et à badenou (8,7%) que dans les usages des sols. Par contre à Haut-sassandra, c'est l'association des cultures cacao-café qui présente le taux le plus important (7,5%) suivie par l'Ignam (6,8%) et la forêt primaire (6,3%).

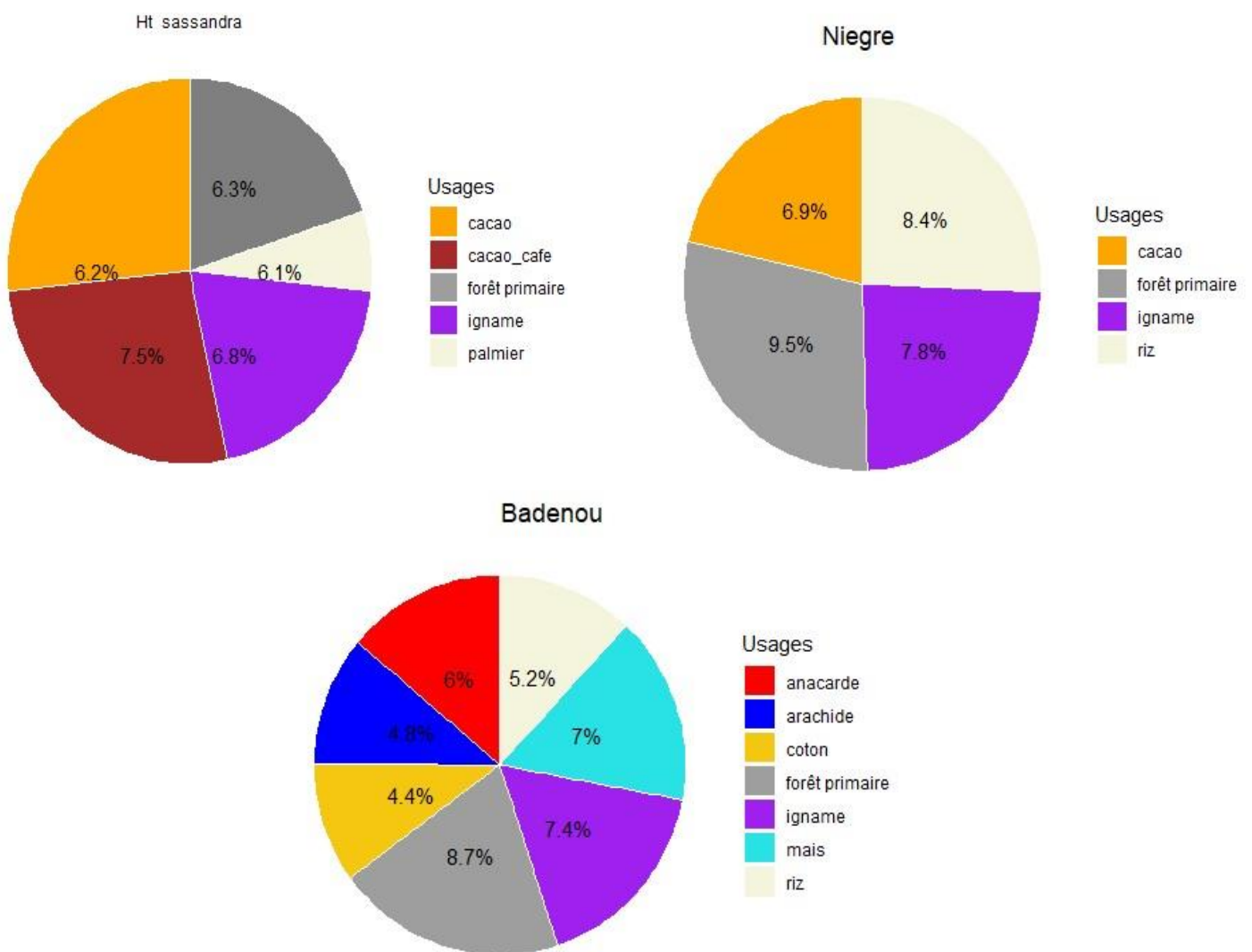


Figure 11: variation du taux de matière organique du sol suivant les principaux usages du sol dans les différentes zones phytogéographique (forêts de Niegre, Badenou et Haut sassandra).

3.1.2. Diversité des microorganismes du sol selon les chronoséquences et les zones phytogéographiques.

Les figures (12,13 et 14) représentent la diversité des microorganismes dans les différentes catégories d'âges dans les forêts classées de Niegré (figure 12), de Badenou (figure 13) et de Haut-Sassandra (figure 14). Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont révélé une différence très hautement significative ($P < 0,0001$) de la diversité des microorganismes du sol entre les catégories d'âges des forêts quelle que soit la zone phytogéographique. Aussi, il apparaît que dans la forêt de Niegré, la diversité microbienne augmente en fonction des catégories d'âge des parcelles. En effet, la différence de diversité microbienne est significative (*) entre [1-10 ans] et [11-20 ans] ; hautement significative (**) entre [1-10 ans] et [21-30 ans] et très hautement significative (***) entre [1-10 ans] et [30 < [et entre [1-10 ans] et foretanc. Globalement, la diversité microbienne est plus élevée dans les catégories foretanc (3,20%) et [> 30 ans] (2,98%) par rapport aux autres catégories d'âge.

Dans les forêts de Badenou et Haut_sassandra, la diversité microbienne présente la même allure. Mais les variations entre les catégories d'âge diffèrent dans chaque forêt. En effet, dans ces deux forêts, la plus faible diversité microbienne est notée dans les parcelles d'âge compris entre 11 et 20 ans avec des valeurs médianes relativement très proches de 2,04 pour Badenou et 2,05 pour Haut_sassandra. Les forêts anciennes (foretanc) présentent les médianes les plus élevées avec 3,16 pour Badenou et 3,20 pour Haut_sassandra indiquant ainsi une similarité dans leur diversité microbienne.

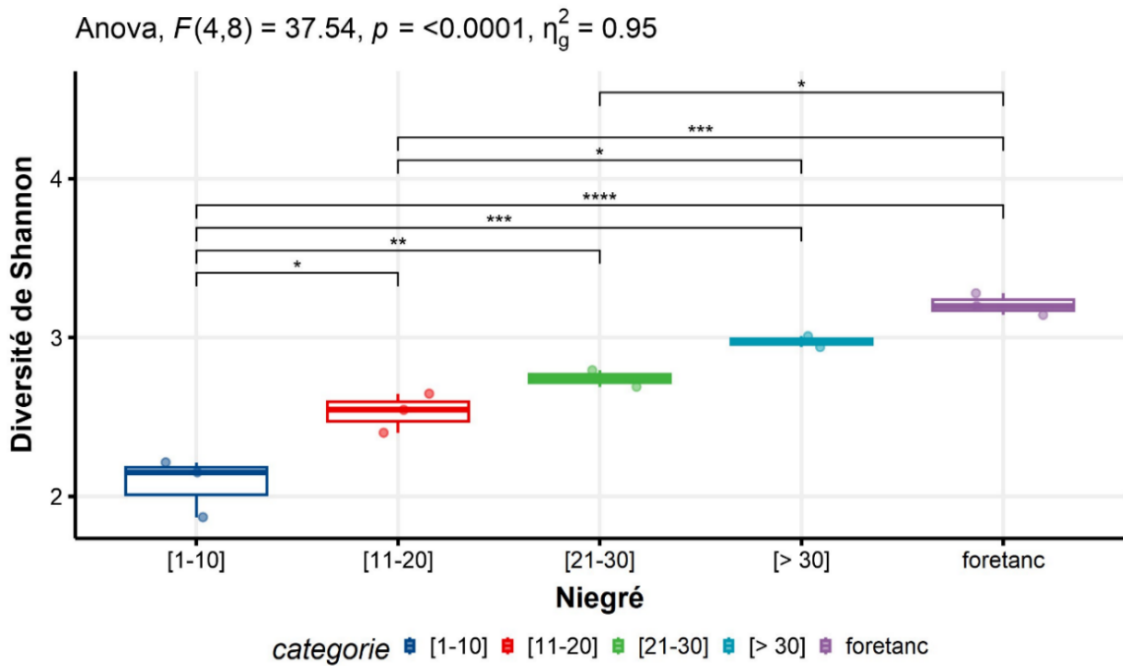


Figure 12: Diversité de Shannon des microorganismes suivant les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Niegré.

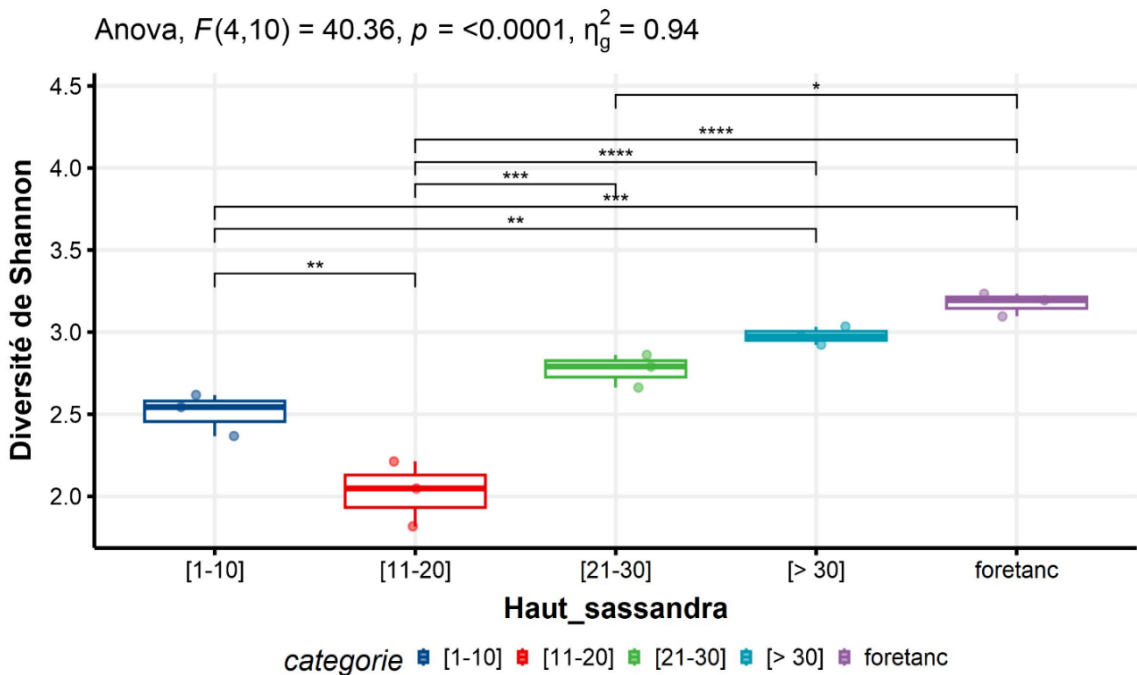


Figure 13: Diversité de Shannon des microorganismes suivant les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Haut_sassandra.

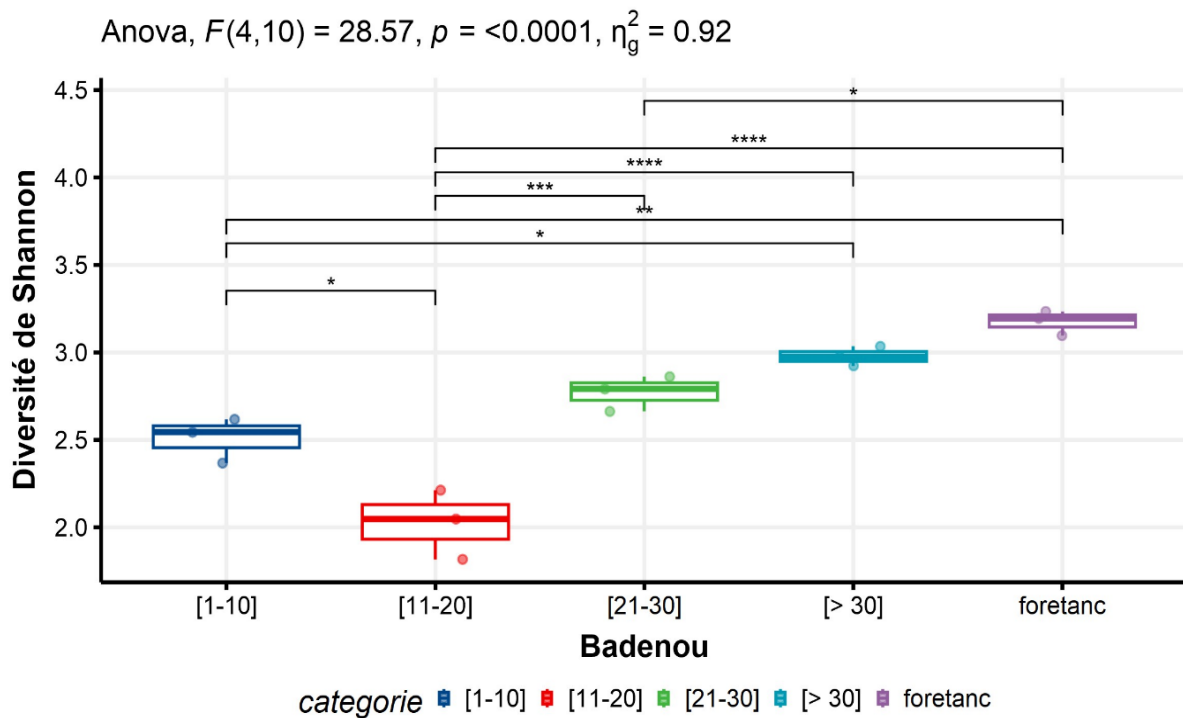


Figure 14: Diversité de Shannon des microorganismes dans les différentes catégories d'âges de la forêt classée de Haut Sassandra.

Légende : **Figure 12 :** Médiane, 1er et 3ème quartiles de la diversité de Shannon dans la Forêt Classée de Niégré, **Figure 13 :** Médiane, 1er et 3ème quartiles de la diversité de Shannon dans la Forêt Classée de Haut_sassandra, **Figure 14 :** Médiane, 1er et 3ème quartiles de la diversité de Shannon dans la Forêt Classée de Badenou. Code de significativité de P : $P > 0,05$ (ns) ; si $0,05 \geq P > 0,01$: différence significative entre deux catégories d'âge(*) ; si $0,01 \geq P > 0,001$: différence hautement significative entre deux catégories d'âge(**) ; si $P < 0,001$: différence très hautement significative entre deux catégories d'âge(***)

3.1.3. Modélisation

3.1.4. Validation du modèle linéaire

Il s'agit de procéder à une évaluation graphique de la linéarité entre la matière organique du sol et la diversité des micro-organismes et à l'évaluation des hypothèses de validité du modèle linéaire.

- **Evaluation graphique de la linéarité**

La figure 15 représente les courbes d'évaluation de la linéarité entre la matière organique du sol (MOS) et la diversité microbienne (microdiv) des 3 zones phytogéographiques (soudanaise, ombrophile et mésophile). Les lignes en trait plein sont les droites de régression linéaire (définie par la méthode des moindres carrés) entre les deux variables d'études. Les lignes centrales en pointillés

sont les courbes de régression locale de type lowess. Elles indiquent les tendances globales entre les variables MOS et microdiv dans chaque zone phytogéographique. L'étude de la forme du lien entre ces variables montre que les droites ne sont pas linéaires car ne suivant pas l'allure de la courbe de linéarité

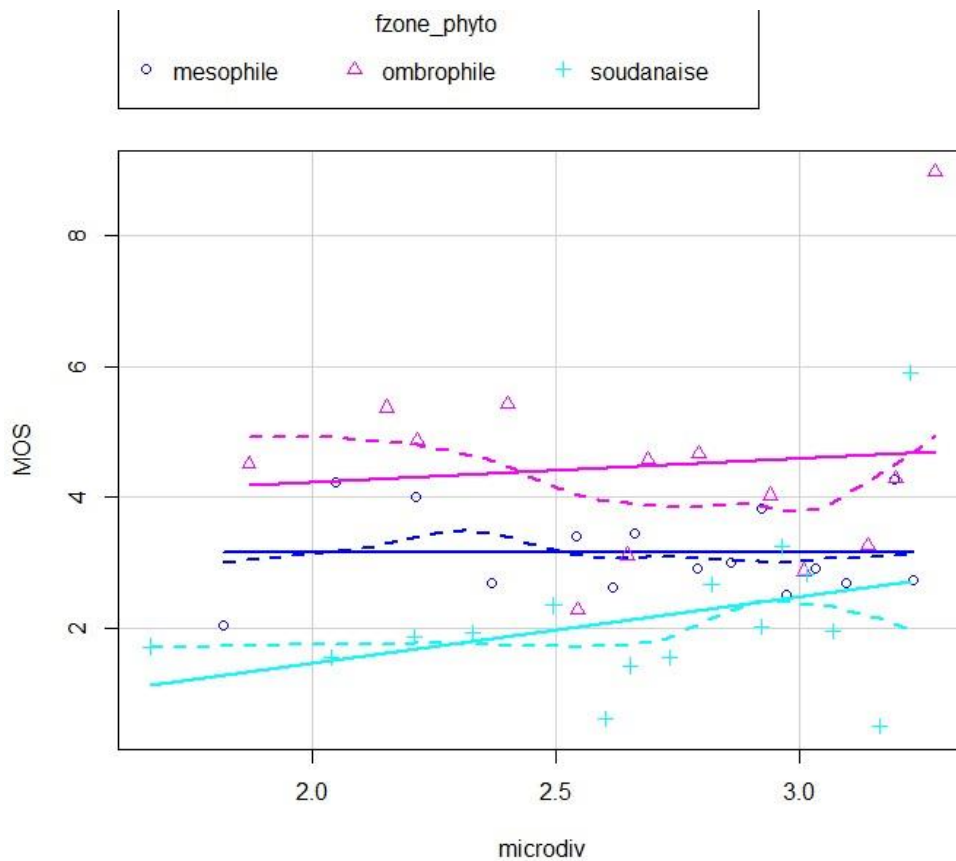


Figure 15: Courbes d'évaluation de la linéarité entre la matière organique du sol (MOS) et la diversité microbienne (microdiv) des 3 zones phytogéographiques.

○ **Evaluation des hypothèses de validité du modèle linéaire**

La figure 16 représente les graphes permettant de tester la validité du modèle linéaire, en effet, les résidus ne sont pas aléatoirement repartis autour de zéro car des "patterns" ou schémas sont notés de part et d'autre de la ligne zéro. Cela suggère une infirmation de l'hypothèse de l'homoscédasticité (variance constante des résidus). Il convient donc de noter qu'il existe certaines preuves d'hétérogénéité des variances (Figure 16 A). La Figure 16 B montre une asymétrie à gauche des résidus, la figure 16 C montre également que les résidus ne sont pas bien distribués suivant une droite. Donc, les résidus ne suivent pas une loi normale (Figure 16 B et Figure 16 C). Les figures 16E et F montrent que les médianes des résidus présentent un schéma ou une tendance identifiable le long des

niveaux de la variable catégorie d'âge et zonephytogeographique autrement dit la dispersion des résidus n'est pas la même pour toutes les catégories d'âge et toutes les zones phytogéographiques, ce qui infirme l'hypothèse d'indépendance.

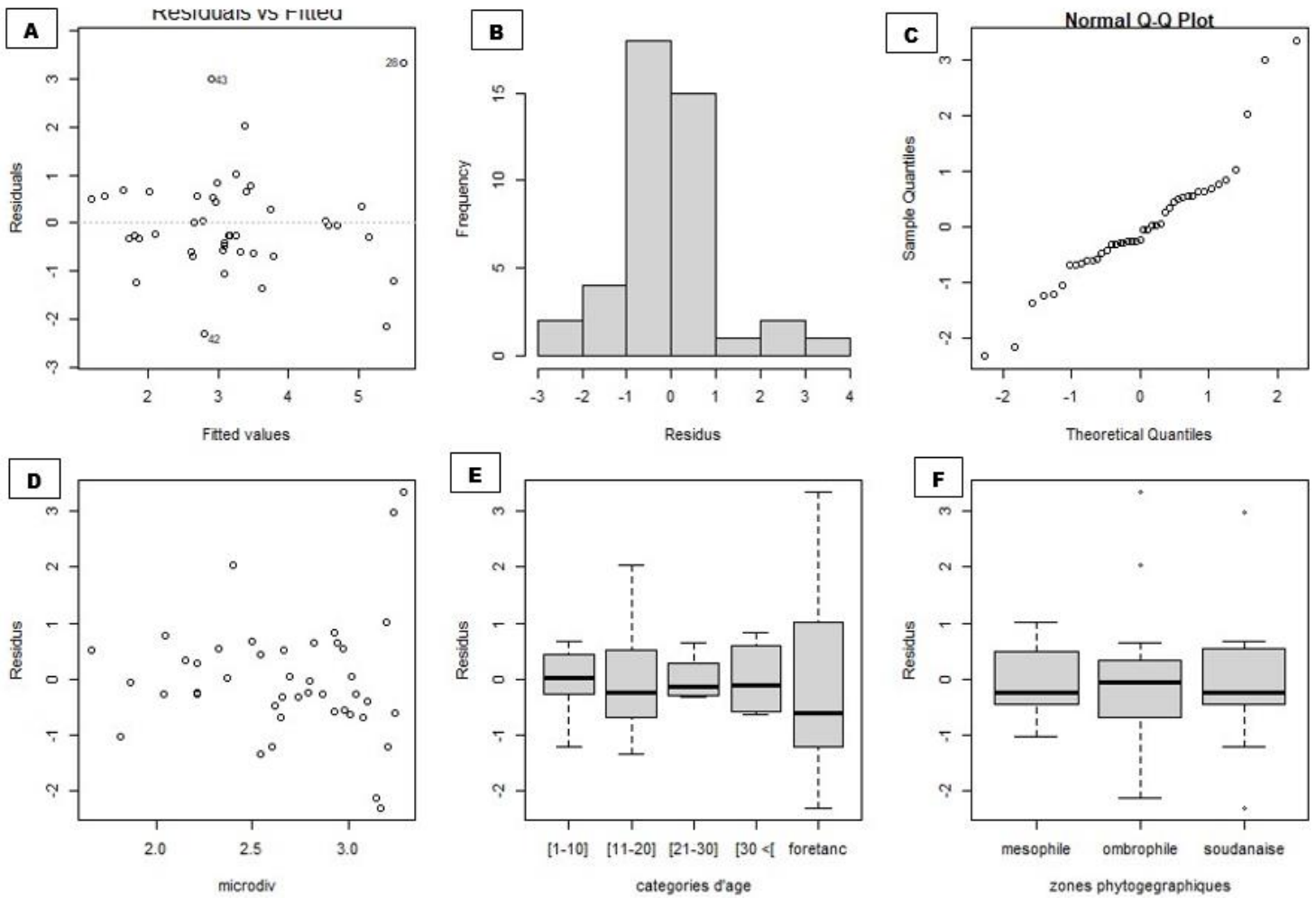


Figure 16: Graphes de validation du modèle linéaire simple. (A) : les résidus standardisés par rapport aux valeurs ajustées ; (B) : histogramme des résidus ; (C) : normal Q-Q plot ; (D) : résidus en fonction de la diversité des microorganismes ; (E) : Boxplot des

3.1.5. Modélisation de la restauration de la matière organique dans trois forêts suivant les différentes zones phytogéographiques en fonction de la diversité des microorganismes

Après exploration des données et invalidation du modèle linéaire, la sélection de modèle en comparant les différents modèles décrits a été effectuée à l'aide de l'AIC (Tableau 6).

Tableau 6: Sélection de modèle avec l'AIC

Modèles		Paramètre K	AIC
Régression linéaire		17	159,3025
GLM	gaussien	17	159,3025
	gamma (link=log)	17	154,2337
	gamma (link=inverse)	17	154,9318
GAM	gaussien(lissage simple)	19	151,0235
	gaussien (lissage cubique : bs = cr)	20	149,6377
	gamma (link=log)	16	156,1487
	gamma (link=inverse)	16	156,5495

Parmi les modèles que nous avons testés, le Modèle Additif Généralisé (GAM) avec une spécification de lissage cubique spline (bs = cr) pour la diversité microbienne, associé aux facteurs zones Phytogéographiques et catégories d'âge, a été sélectionné comme le modèle le plus approprié pour décrire la relation entre la matière organique et les variables explicatives. En effet, il a présenté l'AIC (Critère d'Information d'Akaike) le plus bas (149,6377). Le résultat de la relation entre la diversité des microorganismes et le taux de matière organique pour chaque zone phytogéographique, obtenu à partir de ce modèle, est présenté dans la figure 17.

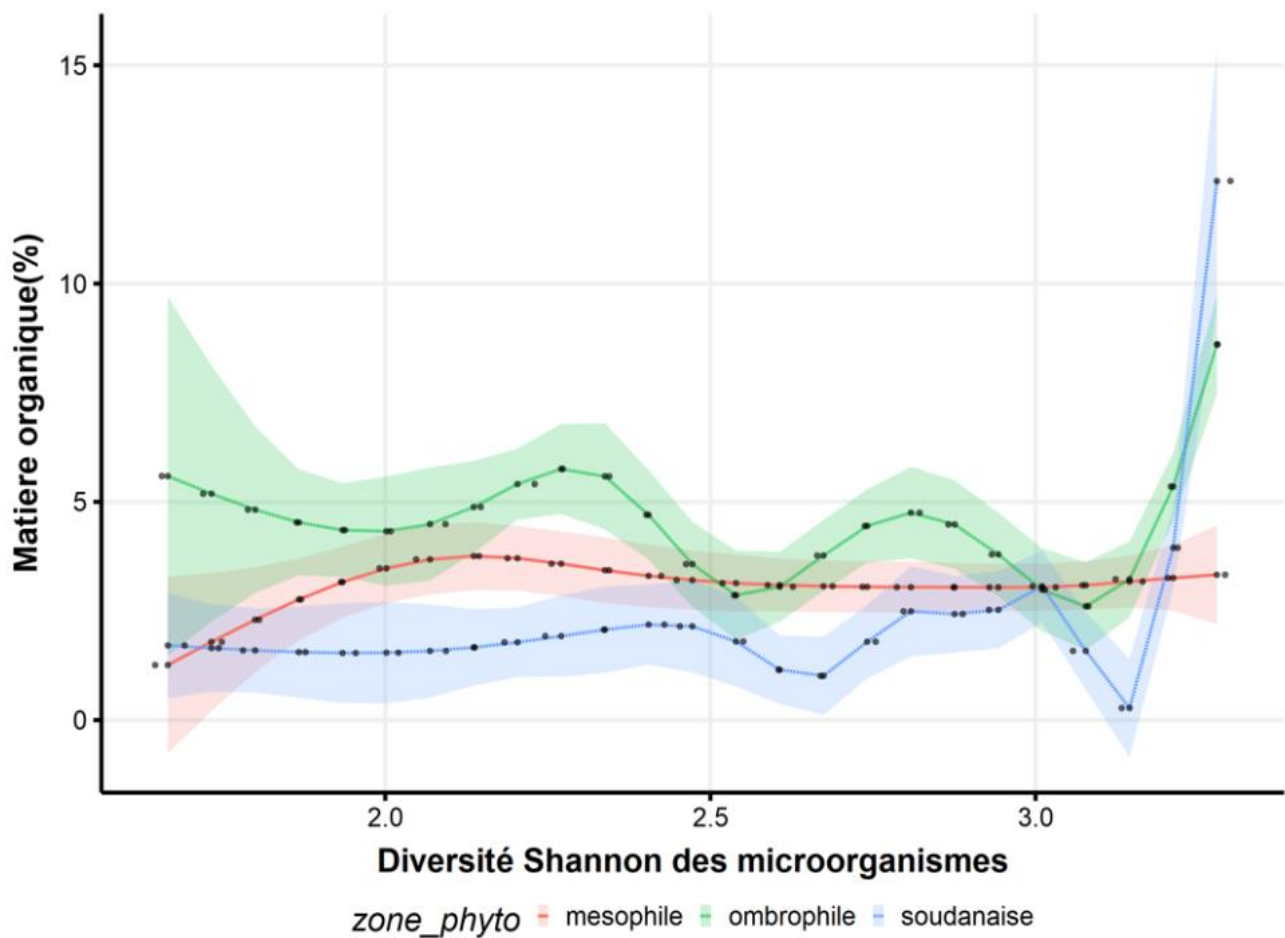


Figure 17: Modèle additif généralisé expliquant la relation entre la diversité des microorganismes et le taux de matière organique pour chaque zone phytogéographique.

L'intervalle de confiance à 95% est représenté en ombrage vert, bleu et rose autour des droites.

Ce modèle GAM offre à la fois un ajustement précis et une flexibilité dans la capture des schémas complexes présents dans les données. Il capture correctement la relation qui existe entre la diversité microbienne et la teneur en matière organique. Aussi, l'intervalle de confiance est grand vu le relatif faible nombre de valeurs utilisé. La diversité microbienne et la zone phytogéographique ombrophile ont présenté une relation significative avec la matière organique du sol. Le test ANOVA du modèle montre une significativité ($P\text{-value} = 0,00355$) de l'effet du facteur phytogéographique en interaction avec la diversité des microorganismes sur la matière organique du sol. Les observations de la figure 17 montrent également que la reconstitution de la matière organique du sol est plus marquée dans la zone ombrophile, suivit de la zone mésophile et en fin la zone soudanaise. Tenant compte de l'influence de la diversité des microorganismes sur le taux de matière organique du sol en fonction

des zones phytogéographiques, cette influence est plus marquée dans la zone ombrophile, suivie de la zone soudanaise et en fin la zone mésophile. Le RMSE obtenue est de 0,86, cela signifie qu'en moyenne, les prédictions du modèle GAM diffèrent de 0,86 unité de la vraie valeur observée. Le coefficient de détermination (R^2) est 0,53. Ce qui signifie que le modèle explique environ 53% de la variance. Ainsi, le RMSE et R^2 suggèrent que le modèle est capable de prédire avec précision la reconstitution de la matière organique du sol en fonction de la diversité microbienne. Cela implique que le modèle peut être utilisé pour anticiper l'évolution de la matière organique du sol en fonction de la diversité microbienne.

3.2. Discussion

3.2.1. Dynamique de la matière organique du sol dans les zones phytogéographiques.

Nos résultats mettent en évidence des tendances divergentes selon les zones forestières, où les plus hautes concentrations de matière organique du sol ne sont pas toujours observées dans les mêmes catégories d'âge d'une zone à l'autre. L'analyse a montré que la teneur en matière organique obtenue dans la zone ombrophile (forêt de Niégré) est en moyenne de 4,48%. Dans la zone mésophile (forêt de haut_sassandra), la moyenne est de 3,15% et au niveau soudanais (forêt de Badenou), elle est de 2,14%. Les résultats ainsi obtenus montrent nettement que la zone ombrophile est plus riche en MOS suivi de la zone mésophile et enfin la zone soudanaise. Il apparaît aussi que la teneur en matière organique est plus élevée dans les forêts anciennes que dans les forêts secondaires (zones post forestier) sauf dans la zone soudanaise où la forêt secondaire de catégorie d'âge [11-20 ans] présente un taux de matière organique (3,43%) légèrement plus élevé que celui noté dans la forêt ancienne (3,22%). Le type de végétation influence les teneurs et les stocks en C organique du sol donc en matière organique du sol (Adjoua N'Goran et *al.*, 2022). En effet, cette affirmation est très logique dans la mesure où les zones ombrophiles reçoivent généralement des précipitations plus importantes par rapport aux zones mésophiles et soudanaises et donc présentent une végétation plus dense. Ces précipitations élevées favorisent la décomposition de la matière organique végétale, augmentant ainsi la quantité de matière organique dans le sol. De plus ces zones avec une végétation plus dense enregistrent une chute des feuilles, des branches, des fruits (Baize, 2020), des bois morts qui constituent la litière au sens large et d'autres matières végétales mortes, contribuent à l'accumulation de matière organique dans les quinze premiers centimètres. La litière d'arbres est connue également pour augmenter la teneur en carbone organique du sol (Logah et *al.*, 2020) donc la teneur en matière organique du sol.

3.2.2. Teneur en matière organique dans les zones post-forestières

La conversion de la forêt vers la cacaoculture (Koné et Yao, 2021) se traduit par une diminution des concentrations de carbone organique du sol (Yao et *al.*, 2010) donc celle de la Matière organique. Dans les différentes forêts, les successions des usages du sol dans le temps sont également souvent liées à une diminution de la teneur en matière organique au niveau des sols. Dans notre étude, comparativement aux autres usages, les parcelles de cacao, de cultures vivrières, de palmiers ont des concentrations en carbone significativement plus faibles que celles des forêts naturelles. Des résultats similaires ont été obtenus par Diallo (2023) dans ses travaux sur les impacts de la déforestation et des usages actuels des terres sur le Carbone Organique des Sols d'une zone post-forestière à Behiri dans le département de Loh Djiboua en Côte d'Ivoire.

3.2.3. Diversité des microorganismes selon les catégories d'âge des différentes zones phytogéographiques.

Les résultats obtenus montrent des différences très hautement significatives de diversité microbienne entre les différentes catégories d'âge dans les forêts de Niégré, Badenou et Haut Sassandra. Ces observations montrent des dynamiques distinctes de diversité microbienne en fonction de l'âge des parcelles forestières. La diversité des microorganismes augmente avec l'âge des forêts aussi bien dans la zone ombrophile que soudanaise, en passant par la zone mésophile. Cela traduit bien le retour des espèces dans les forêts secondaires au fil du temps (Koffi, 2016) et caractérise cette dynamique progressive d'une végétation au repos après un épisode cultural (BoukpeSSI, 2013). En effet un retour d'espèces végétales favorise également celui des microorganismes. Ce qui est en phase avec les études de Mony *et al.* (2021) selon qui la diversité végétale peut conditionner les assemblages de microorganismes présents dans le sol. De plus, les parcelles de plus jeunes âges sont les plus faiblement diversifiées et les sols des forêts primaires sont les plus riches en microorganismes. Cela peut être dû à la conversion des forêts en cultures et en zones de pâturage comme le soutient Lammel *et al.* (2015). Cependant peu d'études portent sur la diversité des microorganismes dans les forêts tropicales, notamment en Afrique subsaharienne.

3.2.4. Modélisation de la reconstitution de la matière organique du sol dans les différentes forêts en fonction de la diversité des microorganismes.

Nos résultats traduisent la non-linéarité de la contribution des microorganismes à la reconstitution de la matière organique dans les différentes forêts. Le Modèle Additif généralisé (GAM) famille gaussian (lissage cubique : $bs = cr$) montre que l'augmentation de la matière organique est fonction d'une augmentation de la diversité des microorganismes. Le test ANOVA de notre modèle montre la significativité ($P\text{-value} = 0,00355$) du facteur phytogéographiques en interaction avec la diversité des microorganismes contenus dans les sols. Dans une étude presque similaire, une modélisation est effectuée pour comprendre la distribution des microorganismes dans le sol en fonction des espèces d'arbres en intégrant plusieurs paramètres dans le modèle. Le meilleur modèle selon cette étude fut celui qui ne prenait pas en compte d'autres facteurs tels que la texture du sol, et la composante des arbustes (Gómez-Aparicio *et al.*, 2012). Cependant même avec tous les facteurs pris en compte ce modèle présente un AIC 2 plus faible que le meilleur modèle selon notre étude. Ce qui permet de supposer qu'un modèle incluant les paramètres physicochimiques du sol pourrait être pertinent pour une étude plus approfondie du phénomène étudié.

La performance du modèle présentée dans cette étude est probante ($RMSE = 0,86$). En effet, cette dernière a permis d'avoir un $RMSE (0,86)$ meilleur comparé à celui obtenu par (Portillo-quintero & Hern, 2022) dans la prédiction des modèles de la richesse spécifique ($RMSE = 25,40$) et de la diversité

fonctionnelle (RMSE = 48,80) dans les forêts tropicales sèches de la péninsule du Yucatan au sud-est du Mexique. Il est aussi meilleur à celui obtenu par (Hernández-Stefanoni *et al.*, 2021) qui a eu pour la prediction de la biomasse et de la diversité en especes des RMSE respectivement 45,40 et 11,70 dans les forêts tropicales sèches de la péninsule du Yucatan au sud-est du Mexique.

CONCLUSION

Cette étude vise à comprendre l'influence des microorganismes dans la restauration de la matière organique des paysages post-forestiers de la Côte d'Ivoire. Les résultats obtenus révèlent des variations significatives du taux de matières organiques entre les différentes zones phytogéographiques. En effet, la zone ombrophile a présenté généralement les concentrations de MOS les plus élevées. Les résultats de l'analyse de la diversité des microorganismes ont révélé que cette dernière augmente avec l'âge des forêts dans les différentes zones phytogéographiques. Les usages des terres, tels que la cacaoculture ont induit une diminution significative de la matière organique du sol. Les zones post forestières présentent généralement des concentrations en matière organique plus faibles, soulignant ainsi l'impact négatif de la conversion des forêts sur la santé et la fertilité des sols. Le modèle additif généralisé de la famille Gaussienne avec lissage cubique a permis d'obtenir la meilleure illustration de la contribution de la diversité des microorganismes à la reconstitution de la matière organique dans les différentes zones phytogéographiques. Il montre qu'il y'a un effet significatif de la diversité des microorganismes sur la reconstitution de la matière organique des paysages post-forestiers.

Ces résultats traduisent la nécessité de mettre en œuvre des stratégies de gestion et de conservation prenant en compte ces interactions complexes en vue maintenir l'équilibre écologique des écosystèmes forestiers et favoriser la régénération des sols dans les paysages post-forestiers de la Côte d'Ivoire.

A la lumière de ces résultats, il apparaît opportun de poursuivre les recherches en vue :

- d'évaluer la contribution de l'abondance des microorganismes à la reconstitution de la matière organique dans les paysages post-forestiers de la Côte d'Ivoire ;
- d'identifier précisément les microorganismes favorisant la récupération de la matière organique à travers l'utilisation de méthodes avancées de biologie moléculaire;
- d'identifier les voies métaboliques liées à la décomposition et à la formation de la matière organique du sol dans les paysages post-forestiers ;
- et de reproduire cette étude dans d'autres localités de la sous-région, notamment au Sénégal.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adjoua N’Goran, A. J., Diouf, A. A., Diatta, S., Assouma, M. H., Djagoun, A. J., Assogba, G. G. C., Cournac, L., Chapuis-Lardy, L., Blanfort, V., & Taugourdeau, S. (2022). Variability of soil carbon stocks under and outside the tree crown in the sylvopastoral zone of Senegal. *Revue d’Elevage et de Medecine Veterinaire Des Pays Tropicaux(France)*, 75(3), 67–75. <https://doi.org/10.19182/remvt.36984>
- Ahemad, M. (2019). Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria: Paradigms and prospects. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 1365–1377. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.11.020>
- Aigle, B., Lautru, S., Spitteller, D., Dickschat, J. S., Challis, G. L., Leblond, P., & Pernodet, J. L. (2014). Genome mining of *Streptomyces ambofaciens*. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. Vol. 41, Issue 2, pp. 251–263. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1379-y>
- Amani, B. H. K. (2023). Dynamique de succession post- culturale et modelisation de la trajectoire de reconstitution des forets tropicales en cote d’ivoire.203 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36378.62407>
- Amani, B. H. K., N’Guessan, A. E., Derroire, G., N’dja, J. K., Elogne, A. G. M., Traoré, K., Zo-Bi, I. C., & Héroult, B. (2021). The potential of secondary forests to restore biodiversity of the lost forests in semi-deciduous West Africa. *Biological Conservation*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109154>
- Amani, B. H. K., Rés, A., Delano, O., Odou, T., Ursula, H., Adamou, R., Lazare, K., Amani, B. H. K., Guessan, A. E. N., Meersch, V. Van Der, Derroire, G., Pioniot, C., Elogne, A. G. M., Traoré, K., Dja, J. K. N., Ecologie, U. M. R., Agroparistech, D. G., Antilles, U., & Guyane, U. De. (2022). Leçons d ’ une analyse régionale des trajectoires de récupération forestière en Afrique de l ’ Ouest Leçons d ’ une analyse régionale des trajectoires de récupération forestière en Afrique de l ’ Ouest Abstract. 14 p. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac9b4f>
- Antony-Babu, S., Stien, D., Eparvier, V., Parrot, D., Tomasi, S., & Suzuki, M. T. (2017). Multiple *Streptomyces* species with distinct secondary metabolomes have identical 16S rRNA gene sequences. *Scientific Reports* , Vol. 7, Issue 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11363-1> 8 p.
- Araújo, A. S. F., Cesarz, S., Leite, L. F. C., Borges, C. D., Tsai, S. M., & Eisenhauer, N. (2013). Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. *Soil Biology and Biochemistry*, 66, 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.013>

- Assa, B. Koné, A. (2009). Utilisation des données pour l'évaluation de l'hétérogénéité des sols ferrallitiques par la couleur selon le code Munsell . *Agronomie Africaine*, Vol. 20, 179-190 <https://doi.org/10.4314/aga.v20i2.1745>
- Auguet, J. C., Barberan, A., & Casamayor, E. O. (2010). Global ecological patterns in uncultured Archaea. *ISME Journal*, Vol. 4, Issue 2, pp. 182–190. <https://doi.org/10.1038/ismej.2009.109>
- Baize, D. (2020). Les sols et leur formation sous climats tempérés. *Planet-Vie*, 14 p.
- Beibro, H.Y., Kasse, B.K., O. Soulemane, Koue-Bi, M.T., Kouassi, P.K., & Foua.-Bi, K.(2011). Ethnozoologie de la faune mammalogique de la foret classée de badenou (Korhogo, Côte-d'Ivoire) .Vol.22, No 2, 9 p [10.4314/aga.v22i2.68366](https://doi.org/10.4314/aga.v22i2.68366)
- Bertrand, J. C., Caumette P., Lebaron P., Matheron R., & Normand. P. (2011). Ecologie microbienne_ Microbiologie des milieux naturels et anthropisés. Pau Presses universitaires de Pau et des Pays de l'Adour, Vol.1, 1002 p
- Bonfante, P., Genre, A. (2010). Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis, *Nature Communications*, 48 p. <https://www.nature.com/articles/ncomms1046>
- BoukpeSSI, T. (2013). *Diversité floristique, structure et dynamique des agrosystèmes « abandonnés » de la préfecture de sotouboua, Centre-Togo*, Revue du CAMES, p. 176-197.
- Brochier-Armanet, C., Boussau, B., Gribaldo, S., & Forterre, P. (2008). Mesophilic crenarchaeota: Proposal for a third archaeal phylum, the Thaumarchaeota. *Nature Reviews Microbiology* , Vol. 6, Issue 3, pp. 245–252. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1852>
- Buée, M., de Boer, W., Martin, F., van Overbeek, L., & Jurkevitch, E. (2009). The rhizosphere zoo: An overview of plant-associated communities of microorganisms, including phages, bacteria, archaea, and fungi, and of some of their structuring factors. *Plant and Soil*, Vol. 321, Issues 1–2, pp. 189–212. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9991-3>
- Cabello P., Roldán M.D., V. C. M. (2004). *Nitrate reduction and the nitrogen cycle in archaea - PubMed*, pp. 3527–3546. [10.1099/mic.0.27303-0](https://doi.org/10.1099/mic.0.27303-0)
- Catão, E., Castro, A. P., Barreto, C. C., Krüger, R. H., & Kyaw, C. M. (2013). Diversity of Archaea in Brazilian savanna soils. *Archives of Microbiology* , Vol. 195, Issue 7, pp. 507–512. <https://doi.org/10.1007/s00203-013-0882-x>
- Chaban, B., Voisin, S., Kelly, J., Logan, S. M., Jarrell, K. F. (2006). *Molecular Microbiology* _

Microbiology Journal _ Wiley Online Library pp. 259–268.

- Chevallier, T., Razafimbelo, T. M., & Michel, L. C. (2020). Carbone des sols en Afrique Impacts des usages des sols et des pratiques agricoles. Rome/Marseille, FAO/IRD, 268 p. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.34867>
- CIRAD, & MVAD. (2006). *Analyses agronomiques*. 54–60. <https://www.mvad-reunion.org/wp-content/uploads/2019/10/Chap4>.
- Colin, Y., Nicolitch, O., Turpault, M. P., & Uroz, S. (2017). Mineral types and tree species determine the functional and taxonomic structures of forest soil bacterial communities. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol.83, Issue 5 23 p <https://doi.org/10.1128/AEM.02684-16>
- Cordonnier, T., Berger, F., Chauvin, C., Courbaud, B., Fuhr, M., Tenerelli, P., Lafond, V., Luque, S., & Mao, Z. (2016). Modéliser et quantifier les services écosystémiques forestiers à l'échelle des petits territoires. *Sciences Eaux & Territoires, Numéro 21(4)*, 58. <https://doi.org/10.3917/set.021.0058>
- Cotula, L., & Vermeulen, S. (2009). Deal or no deal: The outlook for agricultural land investment in Africa. *International Affairs*, Vol. 85, Issue 6. 1233–1247 <https://doi.org/10.1111/j.1468-2346.2009.00859.x>
- CRA-LR. (2011). Les matières organiques du sol. *Les Produits Organiques Utilisables En Agriculture En Languedoc-Roussillon*, 17–28.
- Crafford, J., Visser, W., & Aggad, K. (2016). *Comment la déforestation affecte la macro- économie nationale*. 32 p.
- Crowther, T. W., Thomas, S. M., Maynard, D. S., Baldrian, P., Covey, K., Frey, S. D., Van Diepen, L. T. A., & Bradford, M. A. (2015). Biotic interactions mediate soil microbial feedbacks to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. Vol. 112, Issue 22, pp. 7033–7038). <https://doi.org/10.1073/pnas.1502956112>
- Cuny, P., Ranjard, L., Maron, P. A., E. d'Oiron V. (2017). La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental - INRAE - Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement 15 p. <https://hal.inrae.fr/hal-02788684>
- Danielsen, L., Thürmer, A., Meinicke, P., Buée, M., Morin, E., Martin, F., Pilate, G., Daniel, R., Polle, A., & Reich, M. (2012). Fungal soil communities in a young transgenic poplar plantation form a rich reservoir for fungal root communities. *Ecology and Evolution*, Vol. 2, Issue 8, pp. 1935–1948. <https://doi.org/10.1002/ece3.305>
- De Boer, W., Folman, L. B., Summerbell, R. C., & Boddy, L. (2005). Living in a fungal world: Impact of

- fungi on soil bacterial niche development. *FEMS Microbiology Reviews* , Vol. 29, Issue 4, pp. 795–811. <https://doi.org/10.1016/j.femsre.2004.11.005>
- Diallo, R. (2023). Impacts de la déforestation et des usages actuels des terres sur le Carbone Organique des Sols d'une zone post-forestière,(Behiri, département de Lôh Djiboua) de Côte d'Ivoire. 30 p.
- Díaz, S., Lavorel, S., De Bello, F., Quétier, F., Grigulis, K., & Robson, T. M. (2007). Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*; Vol. 104, Issue 52, pp. 20684–20689). <https://doi.org/10.1073/pnas.0704716104>
- FAO. (2017). *Carbone Organique du sol: une richesse invisible*.90p. <http://www.fao.org/3/I6937fr/i6937fr>.
- FAO. (2020). Évaluation des ressources forestières mondiales 2020 - Principaux résultats. Rome. <https://doi.org/10.4060/Ca8753fr>, 1–16.
- FAO and ITPS. (2015). Status of the World's Soil Resources. In *Intergovernmental Technical Panel on Soils*. 650 p <http://www.fao.org/3/a-i5199e>.
- Ferreira, A. C. C., Leite, L. F. C., de Araújo, A. S. F., & Eisenhauer, N. (2016). Land-Use Type Effects on Soil Organic Carbon and Microbial Properties in a Semi-arid Region of Northeast Brazil. *Land Degradation and Development*, 27(2), 171–178. <https://doi.org/10.1002/ldr.2282>
- Frontier S. et Pichod-Viale D., 1995.** Écosystèmes : structure, fonctionnement, évolution. Masson, 447 p.
- Gboze, A. E., Sanogo A., Amani B.H.K., K. N. J. (2020). Diversité floristique et valeur de conservation de la forêt classée de Badenou (Korhogo, Côte d'Ivoire) _ *Agronomie Africain*, Vol. 32, No 1, 23 p.
- Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W (2010). Le sol vivant - Bases de pédologie - *Biologie des sols*- EAN13 : 9782880747183, EPFL PRESS.848 p <https://www.epflpress.org/produit/422/9782880747183>
- Gómez-Aparicio, L., Ibáñez, B., Serrano, M. S., De Vita, P., Ávila, J. M., Pérez-Ramos, I. M., García, L. V., Esperanza Sánchez, M., & Marañón, T. (2012). Spatial patterns of soil pathogens in declining Mediterranean forests: Implications for tree species regeneration. *New Phytologist*, Vol. 194, Issue 4, pp. 1014–1024. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04108.x>
- Gougoulias, C., Clark, J. M., & Shaw, L. J. (2014). The role of soil microbes in the global carbon cycle: Tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon

- dynamics in agricultural systems. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 94, Issue 12, pp. 2362–2371. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6577>
- Horrigue, W., Dequiedt, S., Chemidlin Prévost-Bouré, N., Jolivet, C., Saby, N. P. A., Arrouays, D., Bispo, A., Maron, P. A., & Ranjard, L. (2016). Predictive model of soil molecular microbial biomass. *Ecological Indicators*, Vol. 64, pp. 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.004>
- Huber Gérald & Schaub Christiane. (2011). La fertilité des sols : L ' importance de la matière organique. *Agricultures & Territoire. Chambre d'Agriculture Bas-Rhin*, 46 pages. <https://agriculture-de-conservation.com/La-fertilite-des-sols-l-importance.html>
- Huber, H., Hohn, M. J., Rachel, R., Fuchs, T., Wimmer, V. C., & Stetter, K. O. (2002). A new phylum of Archaea represented by a nanosized hyperthermophilic symbiont. *Nature*, Vol. 417, Issue 6884, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1038/417063a>
- Janssen, P. H. (2006). Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 72, Issue 3, pp. 1719–1728. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.3.1719-1728.2006>
- Jeffery, S., Gardi, C., Jones, A., Montanarella, L., Marmo, L., Miko, L., Ritz, K., Pérès, G., Römbke, J., & van der Putten, W. H. (Eds. (2010). *European atlas of forest tree species - Publications Office of the EU*. 130 p <https://doi.org/10.2788/94222>
- Jiao, S., Chen, W., & Wei, G. (2022). Core microbiota drive functional stability of soil microbiome in reforestation ecosystems. *Global Change Biology*, Vol. 28, Issue 3, pp. 1038–1047. <https://doi.org/10.1111/gcb.16024>
- Kattge J., Bönisch G., Díaz, S., Lavorel S., Prentice, I. C., Leadley, P., Tautenhahn, S., Werner, G. D. A., Aakala, T., Abedi, M., Acosta, A. T. R., Adamidis, G. C., Adamson, K., Aiba, M., Albert, C. H., Amiaud, B. (2020). TRY plant trait database_ enhanced coverage and open access — Macquarie University, *Global Change Biology* 70 p..
- Koffi K.A.D. (2016). Dynamique de la végétation et valeurs de conservation des espaces anciennement cultivés du Parc national d'Azagny (Sud de la Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët-Boigny, 186 p.
- Konaté, S., & Kampmann, D. (2010). *Biodiversity Atlas of West Africa, Volume III: Côte d'Ivoire*. 560 p.
- Koné, A. W., & Yao, M. K. (2021). Soil microbial functioning and organic carbon storage: can complex timber tree stands mimic natural forests? *Journal of Environmental Management*, Vol. 283, 112002

p <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112002>

- Kouamé, N., & Zoro Bi, I. (2010). Nouveau découpage de la zone de forêt dense humide de la Côte d'Ivoire. *Sciences & Nature*, 7(2), 177–194. <https://doi.org/10.4314/scinat.v7i2.59962>
- Krause, P.; Boyle, D. P.; Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Vol. 5, pp. 89-97 <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Lalande, J. (2013). Détermination de l'impact du Pentachlorophénol sur la diversité bactérienne dans les sols à partir de la technique de l'électrophorèse sur gel en gradient. 307 p
- Lammel, D. R., Feigl, B.J., Cerri, C.C., Nüsslein, K. (2015). Specific microbial gene abundances and soil parameters contribute to C, N, and greenhouse gas process rates after land use change in Southern Amazonian Soils. 14 p <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01057>.
- Lavorel, S., & Garnier, E. (2002). Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail - Lavorel - 2002 - Functional Ecology - Wiley Online Library. *Functional Ecology*, pp. 545–556. <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>
- Lladó, S., López-Mondéjar, R., & Baldrian, P. (2017). Forest Soil Bacteria: Diversity, Involvement in Ecosystem Processes, and Response to Global Change. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, Vol. 81, Issue 2, 27 p <https://doi.org/10.1128/mubr.00063-16>
- Logah, V., Tetteh, E. N., Adegah, E. Y., Mawunyefia, J., Ofosu, E. A., & Asante, D. (2020). Soil carbon stock and nutrient characteristics of Senna siamea grove in the semi-deciduous forest zone of Ghana. *Open Geosciences*, Vol. 12, Issue 1, pp. 443–451. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0167>
- Malika CHIKHI1, M. C. (2012). Estimation du modele lineaire generalise et application. 13–21.
- Manga, P. D. (2013). *Déforestation dans les terroirs Bayotte (au centre) et d'essing (a l'ouest) de la CR de Nyassia (Département de Ziguinchor)*. Mémoire de master 2 à l'université cheikh Anta Diop de Dakar, 170 p.
- Delgado-Baquerizo, M., Maestre, F. T., Reich, P. B., Jeffries, T. C., Gaitan, J. J., Encinar, D., Berdugo, M., Campbell, C. D. & B. K. Singh, B. K. (2016). *Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems* _ *Nature Communications*. 8 p <https://doi.org/10.1038/ncomms10541>
- Marcon, E. (2018). *Mesures de la Biodiversité*. 286 p <https://agroparistech.hal.science/cel-01205813v5>
- Maron, P. A., Mougél, C., & Ranjard, L. (2011). Soil microbial diversity: Methodological strategy, spatial

- overview and functional interest. *Comptes Rendus - Biologies*, Vol. 334, Issues 5–6, pp. 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.12.003>
- Masson, C. (2022). *Dynamique paysagère et suivi de la dégradation forestière et de la déforestation en périphérie de la ville de Kisangani en République Démocratique du Congo*. 47 p. <http://hdl.handle.net/2268.2/16265>
- McGee, K. M., Eaton, W. D., Shokralla, S., & Hajibabaei, M. (2019). Determinants of Soil Bacterial and Fungal Community Composition Toward Carbon-Use Efficiency Across Primary and Secondary Forests in a Costa Rican Conservation Area. *Microbial Ecology*, Vol. 77, Issue 1, pp. 148–167. <https://doi.org/10.1007/s00248-018-1206-0>
- Mendes, L. W., de Lima Brossi, M. J., Kuramae, E. E., & Tsai, S. M. (2015). Land-use system shapes soil bacterial communities in Southeastern Amazon region. *Applied Soil Ecology*, Vol. 95, pp. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.06.005>
- Mony, C., Ricono, C., & Vandenkoornhuyse, P. (2021). *R99 : Diversité des plantes et microorganismes dans les agrosystèmes*. <https://sfecologie.org/regard/r99-oct-2021->
- N'Dja, J. K., & Decocq, G. (2007). Régénération de la forêt dense semi-décidue dans les stades post—cultureux en forêt classée de Sanaimbo (Côte- d'Ivoire). *Acta Botanica Gallica*, Vol. 154, Issue 3, pp. 395–405. <https://doi.org/10.1080/12538078.2007.10516072>
- Nicolitch, O., Colin, Y., Turpault, M. P., & Uroz, S. (2016). Soil type determines the distribution of nutrient mobilizing bacterial communities in the rhizosphere of beech trees. *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 103, pp. 429–445. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.09.018>
- Oszwalds, J., Bigot, S., & Yao, T. B. (2003). Evolution géo-historique de la Forêt Classée du Haut-Sassandra (Côte d'Ivoire). 8 p.
- Pruvost, G. (2018). Les Archées du sol - Les Dossiers de Micro & Macro. Chez le Père Magraine consulté le 25 novembre 2023. <https://chezleperemagraine.com/blog/micro-macro-archees-du-sol/>
- Ranjard, L.-A. M., & Verame, P. C. et E. d'Oiron. (2017). La microbiologie moléculaire au service du diagnostic environnemental. *ADEME*, 234 p.
- Reed, S. C., Cleveland, C. C., & Townsend, A. R. (2011). Functional Ecology of Free-Living Nitrogen Fixation: A Contemporary Perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 42, Issue 1, pp. 489–512. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145034>
- RGPH-CI. (2021). République De Cote D'Ivoire: Recensement General De La Population Et De L'Habitat

pp. 1–68.

- Riou, V., & Prevost-Bourre, C. N. (2018). Les Bacteries Du Sol. *SOLAG: Bulletin Sol et Agronomie Des Chambres d'agriculture Des Pays de La Loire N°3*, 3, 3–4.
- Ryan R. P., Germaine K., Franks A., Ryan, D. J., Dowling, D. N. (2008). Bacterial endophytes_ recent developments and applications - PubMed pp. 278(1):1-9. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.2007.00918.x>
- Roesch, L. F. W., Fulthorpe, R. R., Riva, A., Casella, G., Hadwin, A. K. M., Kent, A. D., Daroub, S. H., Camargo, F. A. O., Farmerie, W. G., & Triplett, E. W. (2007). Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. *ISME Journal*, Vol. 1, Issue 4, pp. 283–290. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.53>
- Saint Fédriche NDZA. (2020). Memoire Online - Comparaison entre les forêts tropicales adultes et les forêts secondaires de l'axe impfondo-Dongou, département de la Likouala, république du Congo. 42-44 p.
- Sangare, A., Koffi, E. and Akamou, F. (2009). Etat des ressources phylogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture: Second rapport national.65 p.
- Schimel, J. (2004). Playing scales in the methane cycle: From microbial ecology to the globe. In *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (Vol. 101, Issue 34, pp. 12400–12401). <https://doi.org/10.1073/pnas.0405075101>
- Siles, J. A., & Margesin, R. (2016). Abundance and Diversity of Bacterial, Archaeal, and Fungal Communities Along an Altitudinal Gradient in Alpine Forest Soils: What Are the Driving Factors? *Microbial Ecology*, Vol. 72, Issue 1, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0748-2>
- Solter D. (2017). Les bases de la production végétale, T I : le sol et son amélioration., 22e Edition, Editions Sciences et techniques agronomiques, 49130 Saint-Gemmes-Sur-Loire., 472 p.
- Tedersoo, L., Bahram, M., Põlme, S., Kõljalg, U., Yorou, N. S., Wijesundera, R., Ruiz, L. V., Vasco-Palacios, A. M., Thu, P. Q., Suija, V., Smith, M. E., Sharp, C., Saluveer, E., Saitt, A. (2014). Fungal biogeography. *Biogeography: An Integrative Approach of the Evolution of Living* pp. 193–218. <https://doi.org/10.1126/science.1256688>
- Terrat, S., Horrigue, W., Dequiedt, S., Saby, N. P. A., Lelièvre, M., Nowak, V., Tripied, J., Régnier, T., Jolivet, C., Arrouays, D., Wincker, P., Cruaud, C., Karimi, B., Bispo, A., Maron, P. A., Prévost-Bouré, N. C., & Ranjard, L. (2022). Correction: Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *Plos One*, Vol. 17, Issue 5, p. e0268101).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268101>

- Toju, H., Kishida, O., Katayama, N., & Takagi, K. (2016). Networks depicting the fine-scale co-occurrences of fungi in soil horizons. *PLoS ONE*, Vol. 11, Issue 11. 18 p
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165987>
- Touré, A. (2017). *Geomorphologie de la Cote d'Ivoire*. 23 p.
- Traore, S. S. H. (2012). Etude des impacts agro-pédologiques des apports continus et en rotation de fertilisants organo-minéraux sur le cotonnier en stations de recherche : cas de Sana et Farako-Bâ. 66 p.
- Tredennick, A. T., Adler, P. B., & Adler, F. R. (2017). The relationship between species richness and ecosystem variability is shaped by the mechanism of coexistence. *Ecology Letters*, Vol. 20, Issue 8, pp. 958–968). <https://doi.org/10.1111/ele.12793>
- Tredennick, A. T., Hooker, G., Ellner, S. P., & Adler, P. B. (2021). A practical guide to selecting models for exploration, inference, and prediction in ecology. *Ecology*, Vol. 102, Issue 6.16 p
<https://doi.org/10.1002/ecy.3336>
- Uroz, S., Dessaux, Y., & Oger, P. (2009). Quorum sensing and quorum quenching: The Yin and Yang of bacterial communication. *ChemBioChem*, Vol. 10, Issue 2, pp. 205–216.
<https://doi.org/10.1002/cbic.200800521>
- Van der Wal, A., Geydan, T. D., Kuyper, T. W., & De Boer, W. (2013). A thready affair: Linking Fungal diversity and community dynamics to terrestrial decomposition processes. *FEMS Microbiology Reviews*, Vol. 37, Issue 4, pp. 477–494. <https://doi.org/10.1111/1574-6976.12001>
- Walser, M., Mathis, D. S., Köchli, R., Stierli, B., Maeder, M., & Brunner, I. (2021). Le sol forestier vit - diversité et fonctions des organismes vivants du sol. *Notice Pour Le Praticien*, 60, 1–12.
www.wsl.ch/publications
- Yao, M. K., Angui, P. K. T., Konaté, S., Tondoh, J. E., Tano, Y., Abbadie, L., & Benest, D. (2010). Effects of land use types on soil organic carbon and nitrogen dynamics in mid-west Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 40, Issue 2, pp. 211–222.
- Zuur, A. F., Elena N. Ieno, E. N., Walker, N. J., Anatoly, A. Saveliev, G. M. S. (2019). Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R. *Smart Society: A Sociological Perspective on Smart Living*. 570 p <https://doi.org/10.4324/9780429201271-2>.

