



Université Assane Seck de Ziguinchor

UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de Physique

Mention : Physique et Applications

Mémoire de MASTER

Spécialité : Énergies Renouvelables et Efficacité Énergétique

Option : Énergie Solaire et Bioénergie

Sujet :

Utilisation de biochar et de digestat pour l'amendement de sol pour une culture sous serre

Présenté et soutenu publiquement par : Jeanne Marie Annick TROH

Le 01/04/2023 devant le jury composé :

Nom Prénom	Grade	Qualité	Établissement
M. NDIAYE Lat Grand	Professeur Titulaire	Président de jury	UASZ/ UFR-ST
M. TINE Modou	Maitre de Conférences Assimilé	Rapporteur	UASZ/ UFR-ST
M. THIAME Moustapha	Professeur Assimilé	Examineur	UASZ/ UFR-ST
M. SOUMARE Abdoulaye	Maitre de Conférences Assimilé	Examineur	UASZ/ UFR-ST
M. DIEDHIOU Ansoumane	Maitre de Conférences Assimilé	Encadrant	UASZ/ UFR-ST
M. KOBOR Diouma	Professeur Titulaire	Superviseur	UASZ/ UFR-ST

DEDICACES

Je dédie ce mémoire à :

Mes *parents*, nul hommage ne serait à la hauteur de votre amour et de votre dévouement pour moi ; Que le *Seigneur* vous protège et vous prête une longue vie jusqu'à

l'accomplissement de mes désirs les plus profonds pour vous ;

Mes *sœurs* et mon *petit frère* que j'aime tant ;

Mes *tatas* et *tontons* qui ne se sont jamais lassés de me soutenir moralement ;

Mes *amis* qui se sont toujours montrés infatigables

Et enfin à mes enfants d'amour *Idy* et *Simone* ma joie de vivre *Maman* vous aime.

Que le *Seigneur* dans son infini Grâce vous protège de tout mal, *Amen*.

REMERCIEMENTS

Avant tout je remercie le Seigneur pour sa grâce, sa bienveillance, sa miséricorde et sa bonté jusqu'à l'accomplissement de ce modeste travail, AMEN.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Ansoumane Diedhiou, pour son encadrement, ses conseils, sa flexibilité et surtout sa disponibilité. Toujours prêt à donner un coup de main, toujours présent quand on a besoin de lui et j'ai grandement apprécié de travailler à ses côtés. Il a su être à l'écoute de mes besoins et être très encourageant dans le cheminement de mon travail. Un grand merci du fond du cœur monsieur Diedhiou. Que le désir de votre cœur soit exaucé.

Ensuite, il convient de remercier tous les gens qui ont contribué à l'avancée de mon mémoire. Je remercie Monsieur Yock sans qui j'aurais eu la difficulté de disposer de certains appareils pour mes mesures ; je vous dis un grand merci. Je remercie en même temps Monsieur Soumaré du département d'Agroforesterie pour sa disponibilité et sa gentillesse qui a pris le temps d'analyser une bonne quantité de mes échantillons chaque semaine tout au long de l'expérience. Mes remerciements vont aussi au restant des membres du jury le président Monsieur Lat Grand NDIAYE, le rapporteur Monsieur Modou TINE et l'examineur Monsieur Moustapha THIAME pour l'intérêt qu'ils ont portés à mon travail en acceptant de l'examiner.

Je remercie mon PAPA et ma MAMAN pour leur soutien, ils ont toujours été d'une grande aide dans toutes les épreuves que j'ai eu à traverser dans ma vie, donc même merci ne suffit pas pour vous dire mes ressentis envers vous. Mon amour pour vous dépasse toute limite. Je vous aime.

Je remercie mes enfants pour la force et la motivation qu'ils m'ont donnée jusqu'à l'accomplissement de ce travail. Un grand merci à vous.

Merci aux membres de ma famille maternelle comme paternelle pour vos encouragements.

Merci à toutes ces personnes que j'ai eu à fréquenter et à échanger tout au long de mon travail.

RESUME

Il est essentiel d'avoir des systèmes alimentaires sains, durables et intrusifs pour atteindre les objectifs mondiaux tel que l'agriculture qui est l'un des leviers les plus importants du développement économique. Alors pour obtenir d'importants rendements agricoles l'utilisation de l'engrais chimique s'est avérée être une solution. Par conséquence cette solution est à l'origine d'un niveau de pollution non soutenable et un appauvrissement des sols quant à leur utilisation à long terme alors une solution s'impose pour endiguer de tel problème. Ainsi deux types de biofertilisants (biochar obtenue par pyrolyse et digestat issue d'une digestion anaérobie de de biomasse) étaient utilisés en vue d'évaluer leurs efficacités sur plusieurs paramètres des deux types de sols utilisés, un sol sableux et un sol cultivable. Cette étude a été menée à l'aide de quatre traitements faits sur les 2 types de sols : un traitement sans fertilisants, un traitement avec 13% de biochar, un traitement avec 13% de digestat et un traitement avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat. Des analyses physico-chimiques étaient faites sur les trois différents traitements tous les sept jours après amendement pour une durée de vingt-huit jours connaissant au préalable celles des sols témoins.

Les résultats ont montré que l'amendement fait avec du biochar a généré une meilleure réserve minérale avec une valeur d'absorbance beaucoup plus importante que les autres types de traitements. Et aussi les traitements ont eu un effet positif sur le pH des sols traités avec du biochar. Par contre des traces de sel sont observées sur les différents substrats traités avec du digestat et du biochar combiné au digestat ce qui aura des répercussions sur les rendements des différentes cultures à développer sur ces types de sols.

Mots-clés : Digestat, Biochar, amendement, sol sableux, sol cultivable

ABSTRACT

Healthy, sustainable and intrusive food systems are essential to achieve global development goals and agriculture is one of the most important levers for economic development. The agricultural sector is the source of unsustainable levels of pollution, so a solution is needed to curb such a problem. Thus, two types of bio-fertilizers (biochar obtained by pyrolysis and digestate from anaerobic digestion of biomass) were used to evaluate their effectiveness on several parameters of the two types of soil used, a sandy soil and a cultivable soil. The study was conducted using four soil treatments: one without fertilizer, one with 13% biochar, one with 13% digestate and one with 6.4% biochar and 6.4% digestate. Physico-chemical analyses were carried out on the three different treatments every seven days for a period of twenty-eight days, knowing beforehand the control soils.

The results showed that the amendment made with biochar generated a better mineral reserve with a much higher absorbance value than the other types of treatments. Also, the treatments had a positive effect on the pH of the treated with biochar. On the other hand, a salinity level is plotted on the different soils treated with digestate and biochar combined with digestate, which will have an impact on the yields of the different crops to be developed on these types of soils.

Key words: Digestate, Biochar, amendment, sandy soil, cultivable soil.

LISTE DES ABREVIATIONS

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

Ca²⁺: Calcium

C : Carbone

CE : Conductivité Electrique

CEC : Capacité d'échange cationique

CH₄ : Méthane

CIVE : Culture Intermédiaire à Vocation Energétique

CO₂ : Dioxyde de carbone

COT : Carbone Organique Total

CRE : Capacité de Rétention en Eau d'un sol

Fe : Fer

g : Gramme

g cm⁻³ : Gramme par centimètre cube

GES : Gaz à Effet de Serre

JAA : Jours Après Amendement

K⁺: Potassium

Mg²⁺ : Magnésium

mg g⁻¹ : Milligramme par gramme

mg L⁻¹ : Milligramme par litre

mm : Millimètre

MO : Matière organique

MOS : Matière Organique du Sol

N: Azote

Na: Sodium

NH_4^+ : Ammonium

N_2O : Protoxyde d'azote

NO_2 : Dioxyde d'azote

NO_3^- : Nitrate

NO_x : Oxyde d'azote

P: Phosphore

pH : Potentiel d'Hydrogène

PO_4^{3-} : Phosphate

ppb : Partie par milliard

TDS : Total des Solides Dissous

Zn : Zinc

$\mu\text{S}/\text{cm}$: Microsiemens par centimètre

TABLE DES MATIERES

<i>DEDICACES</i>	ii
<i>REMERCIEMENTS</i>	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
TABLE DES MATIERES	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES TABLEAUX	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	2
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
I-1-Les caractéristiques du sol.....	3
I-2-Utilisation du char pour la fertilisation du sol.....	5
I-2-1-Qu'est-ce que le biochar ?.....	5
I-2-2- Historique du biochar.....	6
I-2-3-Intérêt du biochar comme amendement.....	7
I-2-4-Effet du biochar sur la rétention des nutriments	8
I-2-5- Le biochar et les organismes du sol.....	10
I-3- Utilisation du digestat pour l'amélioration du sol.....	12
I-3-1-Comment produit-on le digestat ?.....	12
I-3-2- Valorisation agronomique du digestat : effet sur les cycles de carbone et d'azote dans les agrosystèmes	13
I-3-3- Effet du digestat sur les propriétés du sol.....	14
I-3-4-Etat de nos connaissances sur l'impact des digestats.....	15
I-3-5-Co-application du digestat et du biochar sur le sol.....	16
Conclusion.....	16
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE	18
II-1-Matériel.....	19
II-1-1-Les sols	19
II-1-2-Les amendements	20
II-1-3-Un pH-mètre.....	21
II-1-4-Le Spectrophotomètre à UV-Visible	22

II-1-5-Un Conductimètre CO 3000L	22
II-2-Méthode	23
II-2-1-Protocole du pH-mètre.....	23
II-2-2-Protocole d'utilisation du Conductimètre.....	24
II-2-3-Application des amendements.....	24
II-2-4-Protocole du Spectrophotomètre à UV-Visible.....	25
II-2-5-Mesure des paramètres	26
II-2-5-1-Mesure du pH.....	26
II-2-5-2-Mesure de la conductivité électrique, du TDS et de la salinité	26
II-2-5-3-Mesure de l'absorbance.....	26
Conclusion.....	26
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	27
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION	28
III-1-Résultats	28
III-1-1-Effet des traitements sur la conductivité électrique	28
III-1-2-Effet des traitements sur la salinité	29
III-1-3-Effet des traitements sur le TDS	31
III-1-4-Effet des traitements sur le pH	32
III-1-5-Effet des traitements sur l'absorbance	33
III-2-Discussion.....	36
III-2-1-Effet des amendements sur les propriétés physico-chimiques des substrats.....	36
III-2-2-Effet des amendements sur les propriétés minérales des substrats	38
Conclusion.....	39
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	40
BIBLIOGRAPHIE	42
ANNEXE.....	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Production de biochar par le procédé de pyrolyse.....	6
Figure 2: Production de digestat (figure inspiré ADEME)	13
Figure 3: Effet du digestat sur les cycles de carbone et d'azote	14
Figure 4: Photo d'un Sol sableux.....	19
Figure 5: Photo d'un sol cultivable	20
Figure 6 : Photo de Biochar	20
Figure 7 : Photo de Digestat.....	21
Figure 8: pH-mètre HANNA HI 9811-5	21
Figure 9: Spectrophotomètre Genesys 10S UV-Vis	22
Figure 10: Conductimètre pHenomenal™ VWR3000L	23
Figure 11: Courbe d'évolution de la Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des substrats en fonction du nombre de JAA .	29
Figure 12: Courbe d'évolution de la Salinité des substrats en fonction du nombre de JAA	30
Figure 13: Courbe d'évolution du TDS (mg/L) des substrats en fonction du nombre de JAA	32
Figure 14: Courbe d'évolution du pH des substrats en fonction du nombre de JAA	33
Figure 15: Courbe d'évolution d'absorbance à 500nm des substrats en fonction du nombre de JAA	34
Figure 16: Courbe d'évolution d'absorbance à 1100nm des substrats en fonction du nombre de JAA	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: La valeur de la conductivité des deux sols témoins	28
Tableau 2: La valeur de la salinité des deux sols témoins	30
Tableau 3: La valeur du TDS des deux sols témoins	31
Tableau 4: La valeur du pH des deux sols témoins et des deux amendements.....	32
Tableau 5: La valeur de l'absorbance des deux sols témoins à 500nm	33
Tableau 6: La valeur de l'absorbance des deux sols témoins à 1100nm	34

INTRODUCTION GENERALE

L'agriculture est la principale source de revenu de 80% de la population pauvre dans le monde. Ce secteur joue un rôle déterminant dans la réduction de la pauvreté, la hausse des revenus et la garantie de la sécurité alimentaire d'après la Banque Mondiale (de Preneuf, 2022). Dans l'agriculture, la fertilisation joue un rôle très important pour l'augmentation de la production agricole, et compenser le manque des nutriments dans le sol. En effet, certains sols sont plus fertiles que d'autres naturellement, même les sols riches en nutriments ont besoin des fertilisants pour être des sols bien équilibrés et très riches en éléments nutritifs. Cela permettra d'améliorer les rendements des cultures en quantité et en qualité. Alors l'utilisation d'engrais chimiques s'avère être une solution face à ce problème. Malgré le coût très onéreux des engrais chimiques sur le marché, leur utilisation à long terme a des inconvénients multiples que sont : l'appauvrissement des sols, sa nocivité pour la santé, la pollution de l'environnement et la mauvaise qualité des aliments (Mathieu, 2020). Donc il est important de se tourner vers une agriculture biologique et durable qui sera rentable et capable de maintenir ou d'améliorer l'état biologique des sols. Les micro-organismes des sols remplissent l'ensemble de ces fonctions : la minéralisation, la structuration et la stabilité du sol, la régulation des pathogènes et la dépollution (*Le sol*, s. d.). Leur abondance et leur diversité sont aujourd'hui considérées comme des indicateurs de la qualité des sols plus précisément de leur fertilité. Dans l'optique de bénéficier des ressources et des services fournis par le sol, ce mémoire de recherche propose l'utilisation d'amendements organiques pour améliorer la structure physico-chimique du sol et diminuer l'érosion du sol, avoir un effet régulateur sur sa salinité et sur son pH. Cette pratique d'amendement va permettre au sol de stocker davantage de l'eau et aussi permettre au milieu de culture une limitation des pertes des éléments nutritifs, contribuant ainsi à améliorer significativement la fertilité du sol.

Pour y parvenir le travail sera scindé en trois chapitres qui sont :

- Le premier chapitre développe la synthèse bibliographique ;
- Le deuxième chapitre porte sur les matériels et méthode
- Et enfin le troisième chapitre montre les résultats et discussion.

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

L'agriculture sous serre consiste principalement à faire pousser des plantes ou des cultures dans une structure avec des murs et un toit principalement en matériau transparent. L'intérieur d'une serre exposée au soleil est nettement plus chaud que la température extérieure, protégeant ses plantes des conditions extrêmes. Au-delà, d'éloigner les cultures des oiseaux et autres animaux susceptibles de nuire aux cultures, cette culture révèle des pratiques négatives liées à l'amendement de sol (utilisation de la chaux, et d'engrais chimiques). Ainsi, l'utilisation des engrais chimiques semblent être très dangereux pour l'environnement, la santé et la qualité des aliments d'après l'Organisation Mondiale de la Santé (Massemin, 2015). Il est donc important et judicieux de limiter autant que possible l'utilisation d'engrais chimiques dans la production. Cependant, la chaux vive ou oxyde de calcium a été beaucoup utilisée au jardin par des agriculteurs comme antiseptique. Elle est un produit chimique commercial, qui favorise la fertilité et améliore les sols acidifiés en augmentant le taux de pH. Pour réduire la dépendance à cette pratique d'amendement, il est nécessaire d'adopter des techniques agricoles alternatives comme le biochar pour le traitement du sol et le digestat pour son amélioration. Dans ce chapitre nous allons faire une étude bibliographique des caractéristiques du sol, et quelques techniques d'amélioration et de traitement de sol.

I-1-Les caractéristiques du sol

Dans un sens traditionnel, le sol est un milieu naturel pour la croissance des plantes. Le sol a également été défini comme un corps naturel comprenant des couches composées de matériaux altérés minéraux, de matières organiques, d'air et d'eau. Le sol dépend de plusieurs caractéristiques (Jardiner Autrement, 2016) qui sont :

- La texture : elle se définit par ses proportions relatives en argile, limon, sable fin, sable grossier. Or, ces particules plus ou moins fines interviennent sur les propriétés physiques du sol ;
- La structure : elle est le mode d'assemblage des particules qui composent le sol. Elle conditionne une propriété, la porosité, qui est un facteur important de la perméabilité du sol ;
- Le pH : mesurant l'acidité et l'alcalinité du sol sur une échelle de 1 à 14.

- ❖ Pour un pH en dessous de 6,5 le sol est acidifié. L'acidité se caractérise par une faible activité des micro-organismes souterrains, un quasi absence des vers de terre, le blocage de l'assimilation par les plantes de certains éléments nutritifs ainsi qu'une croissance perturbée, l'apparition de toxicité liée à l'absorption de métaux comme l'aluminium. L'acidification est un processus naturel en climat tempéré qui s'accélère en saison pluvieuse. Au fil du temps les sols de culture s'acidifient suite à la nitrification de l'ammonium provoquée par des bactéries quand des engrais azotés synthétiques sont ajoutés au sol. Un milieu très humide et non aéré favorise la production d'acides organiques. Un sol acide produit plus facilement une accumulation de matières organiques non décomposées facilitant l'émergence de maladies sur les végétaux.
- ❖ Pour un pH au-dessus de 7,5 le sol est basique ou alcalin. Ça veut dire que le sol renferme une forte concentration de chaux libre (carbonate de calcium). Son pouvoir tampon est alors extrêmement élevé. Cette augmentation du pH est causée probablement par : l'érosion qui retire les couches superficielles les plus acides. De même que l'affaissement du sol (oxydation, tassement et disparition) d'une couche de terre noire sus-jacente à un sol minéral.

En agronomie, on considère que le potentiel de fertilité n'est pas affecté quand le pH se situe dans une plage entre 6,5 (légèrement acide) à 7,5 (légèrement alcalin). La plupart des éléments nutritifs sont absorbés de façon optimale par les plantes dans cette plage de pH qui est aussi compatible avec la croissance de leurs racines. L'activité de la microflore est plus intense en milieu neutre. Au voisinage de la neutralité (pH 7), la conversion microbienne de l'ammoniac en nitrate est rapide. Un pH neutre favorise également la dégradation des produits phytosanitaires (*Influence du pH sur le potentiel de fertilité des sols cultivés, s. d.*).

Tenant compte de tous ces éléments évoqués plus haut, une valeur neutre est une bonne moyenne pour l'ensemble des cultures (*Influence du pH sur le potentiel de fertilité des sols cultivés, s. d.*). C'est cette valeur que nous devons rechercher par l'apport d'amendements appropriés en utilisant soit le digestat pour fertiliser ou le char pour traiter.

I-2-Utilisation du char pour la fertilisation du sol

I-2-1-Qu'est-ce que le biochar ?

Le biochar est un produit solide noir obtenu par la carbonisation de la biomasse. Cette dernière peut être une matière lignocellulosique riche en carbone tels les herbes, les résidus végétaux, agricoles et forestiers (Yao et al., 2012). Cependant, il se distingue du charbon et des matières analogues du fait qu'il est produit dans le but d'être appliqué au sol comme un moyen d'améliorer leur fertilité, d'augmenter le stockage de carbone, ou même de favoriser la filtration de l'eau de percolation du sol (Lehmann & Joseph, 2009). La classification du biochar se base sur son processus de production ainsi que l'utilisation qui en est prévue. La décomposition thermique est connue sous le nom de pyrolyse (Figure 1) et se déroule sous un environnement pauvre ou nul en oxygène (Mukherjee & Zimmerman, 2013) afin d'éviter la combustion du biochar qui le réduirait en cendres. Le terme « pyrolyse » est employé d'une part pour un procédé servant à analyser chimiquement le contenu de diverses substances organiques telle la matière organique du sol (Leinweber & Schulten, 1999). Et d'autre part pour des systèmes de production de bioénergie qui capturent les effluents gazeux émis lors de la carbonisation de biomasse et utilisés pour produire de l'hydrogène, des gaz de synthèse, des bio huiles, de la chaleur ou de l'électricité (Bridgwater et al., 1999). Lors du processus de pyrolyse, le carbone labile de la biomasse se transforme en « carbone noir » possédant une forte stabilité, et par conséquent, peut demeurer dans le sol des milliers d'années (Pudasaini et al., 2012). La qualité du biochar et son potentiel d'application au sol agricole ainsi que son pouvoir de séquestration du carbone sont donc fortement influencés par ses caractéristiques qui varient selon les conditions de production comme la température de pyrolyse et la matière première utilisée (Angin & Şensöz, 2014). Le biochar possède un fort ratio surface/volume et une forte affinité pour les ions inorganiques sans compter sa composition dominée par la présence de composés aromatiques récalcitrants lui offrant une excellente résistance à la dégradation et un grand pouvoir d'adsorption (Lehmann & Joseph, 2009). Les propriétés du biochar varient fortement dans leur contenu minéral et leur pH, mais tout autant dans leurs propriétés chimiques et physiques. Généralement, le biochar est alcalin, mais peut présenter un pH de 4 à 12 selon les conditions du processus de fabrication, dont la température et le degré d'oxygénation.

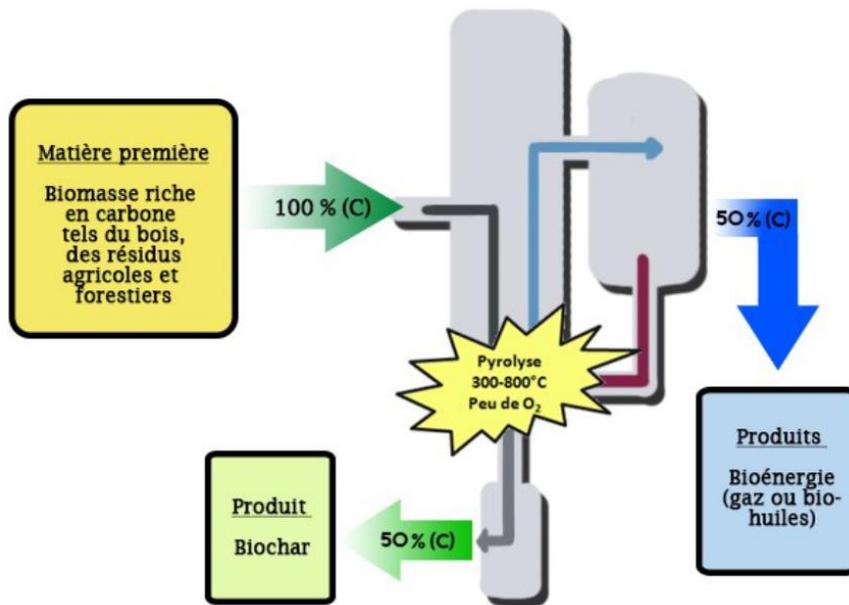


Figure 1: Production de biochar par le procédé de pyrolyse(Laurin-Lanctôt, 2015)

La pyrolyse qui produit le biochar utilise une biomasse riche en cellulose comme matière première telle des copeaux de bois, des résidus de maïs, de riz, de la coque d'arachide, de la boue de papeterie, du fumier animal et des résidus de l'agriculture ou de la foresterie. La biomasse riche en carbone est brûlée dans un four industriel sous haute température et dans un environnement pauvre en oxygène.

I-2-2- Historique du biochar

Le biochar provient des pratiques agricoles des habitants d'Amazonie qui incorporaient de grandes quantités de charbon au sol ainsi que des fumiers et autres engrais biologiques pour améliorer les rendements de leurs cultures (Sohi, 2012) . Aujourd'hui, après plus de 500 années après la fin de ces pratiques agricoles qui ont mené à leur création, les sols noirs d'Amazonie ou Terra Preta sont les plus prisés des sols agricoles pour leur excellente fertilité, leur fort contenu en éléments nutritifs (C, N, P, K et Ca), leur bonne capacité d'échange cationique (CEC) et leur capacité à retenir et recycler les éléments nutritifs sur de longues périodes de culture (Laird et al., 2010) De plus, certains auteurs avancent que l'ajout de charbon de bois dans les sols tropicaux fortement fragilisés améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces sols (Glaser et al., 2002) .

L'équivalent actuel du charbon utilisé dans les sols noirs d'Amazonie est un biochar produit par le procédé de pyrolyse décomposant la biomasse première sous de hautes températures et sous de faibles concentrations en oxygène (Lehmann, 2007) .

I-2-3-Intérêt du biochar comme amendement

Le biochar comme amendement du sol a pour rôle d'absorber les composants chimiques néfastes à l'agriculture, alors à ajouter la valeur du pH (Gaunt & Lehmann, 2008). Des études plus récentes sur le sujet recommandent le biochar pour sa capacité d'améliorer l'état des sols, naturellement pauvres ou acides, voire même dégradés par une agriculture intensive (Steiner et al., 2008) en favorisant une meilleure structure du sol, qui en améliore ses propriétés physico-chimiques (Rillig & Mummey, 2006). Globalement, la fertilité des sols est améliorée par l'ajout de biochar grâce à son effet tampon sur le pH du sol ainsi qu'à une meilleure rétention en nutriments dans le sol découlant de la capacité du biochar d'adsorber les cations à sa surface (Liang et al., 2006). Le biochar influence également la communauté biologique du sol entre autre par sa composition et son abondance (Liang et al., 2010). Par conséquent, l'effet du biochar sur les communautés microbiennes du sol a été démontré dans les sols noirs d'Amazonie où une meilleure composition et diversité des communautés microbiennes furent observées (Kim et al., 2007). L'impact sur les organismes du sol est fortement lié aux propriétés intrinsèques du biochar et du type de sol amendé. L'amendement en biochar du sol peut modifier sa masse volumique apparente et son état hydrique et, par conséquent, influencer le développement racinaire des plantes ainsi que la faune du sol (Major et al., 2009). En effet, la masse volumique du biochar est très faible et ce dernier possède une structure poreuse principalement constituée de macro et micropores (Downie et al., 2009). Par ailleurs, les mesures de densité du biochar doivent distinguer entre la masse volumique réelle des particules de biochar et sa masse volumique apparente prenant en compte l'espace occupé par les pores. Les masses volumiques réelles publiées pour le biochar s'élèvent autour de 1,5 à 2,1 g cm⁻³ selon diverses matières premières, tandis que les masses volumiques apparentes sont de l'ordre de 0,09 à 0,5 g cm⁻³ (Lehmann et al., 2011). Ces valeurs de masse volumique sont nettement plus faibles que celles généralement rencontrées pour les sols agricoles (masse volumique apparente d'environ 1,5 g cm⁻³ pour les sols sableux et 1,3 g cm⁻³ pour les argiles et limons).

I-2-4-Effet du biochar sur la rétention des nutriments

Le lessivage des nutriments réduit grandement la fertilité du sol, accélère l'acidification, augmente les coûts liés à la fertilisation, réduit le rendement et menace la santé de l'environnement (Yao et al., 2012). La perte d'éléments mobiles dans le sol, comme les nitrates (NO_3^-), se produit généralement sous des conditions élevées de fertilisation azotée et de minéralisation de la matière organique et s'accompagne assurément d'une perte de cations comme le calcium (Ca^{2+}), le potassium (K^+) et le magnésium (Mg^{2+}). Des pertes en éléments nutritifs dans la rhizosphère aussi importantes que 80% de N, 172% de Ca^{2+} et 136% de Mg^{2+} ont été rapportées (Pudasaini et al., 2012). De telles pertes engendrent des coûts économiques et environnementaux considérables, en particulier les coûts liés aux apports en fertilisant utilisés dans le but de répondre aux besoins des cultures. L'impact environnemental des divers éléments minéraux lessivés dans les nappes phréatiques tel le phosphore (P) est également important puisque ces nutriments contribuent à l'eutrophisation des cours d'eau qui menace les écosystèmes.

Il s'avère donc important de développer des technologies pour maintenir les éléments nutritifs dans le sol. Divers paramètres influencent le lessivage des nutriments dans le sol dont la chimie des argiles, le contenu minéral du sol, la présence de matière organique ainsi que les éléments minéraux dans la solution du sol. Les propriétés physiques du sol, notamment la structure, jouent un rôle important dans la rétention des nutriments. En effet, un sol possédant de plus petits pores présentera une meilleure rétention des éléments nutritifs (Lehmann & Joseph, 2009). De plus, les cycles biogéochimiques des divers éléments nutritifs du sol (par ex. fixation, précipitation, immobilisation et minéralisation) sont aussi fortement impliqués dans le processus de rétention ainsi que les microorganismes qui y participent (Anderson et al., 2011). À cet égard, l'amendement en biochar permettant d'améliorer les propriétés du sol pourrait être une solution afin de réduire les pertes par lessivage.

Malgré leurs nombreux avantages, les biochars sont généralement trop pauvres en nutriments et ont une faible capacité de libération des nutriments lorsqu'ils sont ajoutés au sol (Ding et al., 2016). En conséquence, les biochars affectent positivement les valeurs des sols de mauvaise qualité uniquement. La teneur en éléments nutritifs des biochars peut être augmentée en adsorbant des ions sur eux. Cela peut être fait en adsorbant les nutriments d'une solution spécialement préparée (Lateef et al., 2019) ou en utilisant de la matière première/du biochar pour adsorber les nutriments des eaux

usées contaminées par ces substances (Xiang et al., 2020). Dans ce dernier cas, le biochar a un double usage. Tout d'abord, il peut être utilisé comme adsorbant pour purifier l'eau/les eaux usées des nutriments en excès (tels que NH_4^+ , PO_4^{3-} , NO_3^- , qui provoquent par exemple l'eutrophisation de l'eau), tandis qu'après le processus d'adsorption, le biochar avec des ions adsorbés peut être utilisé comme engrais naturel. Des exemples de ce type de recherche incluent les travaux de Lateef et al., (2019) où les biochars obtenus à partir d'épis de maïs à une température de 300 à 400 ° C ont été utilisés pour l'adsorption des nutriments. Le matériau a été introduit dans une solution aqueuse à 5% de macrominéraux (N, P, K, Ca, Mg...) et d'éléments mineurs (Na, Zn, Fe...). Par la suite, la cinétique de libération des nutriments dans le sol à partir des matériaux obtenus a été étudiée. Le taux de libération des nutriments était rapide au stade initial, puis ralenti à la deuxième étape jusqu'à ce qu'un plateau soit atteint. Ainsi, le biochar enrichi en nutriments peut être un engrais à libération lente efficace. De plus, les matériaux de biochar testés ont eu un effet positif sur la fertilité du sol, réduit le lessivage et la perte de nutriments, ce qui peut être un phénomène courant lors de l'utilisation d'engrais conventionnels. Yao et al., (2011) ont suggéré l'utilisation de biochar obtenu par pyrolyse de résidus de betterave à sucre à 600 °C, pour adsorber les nutriments de l'eau. Ils ont comparé la capacité du biochar ainsi préparé à éliminer les phosphates de l'eau à celle du charbon actif. Des solutions de phosphate spécialement préparées (20 mg L⁻¹ P) ont été utilisées dans l'expérience. Cela montre que les biochars peuvent être utilisés avec succès pour purifier l'eau des nutriments. Ces données montrent que le biochar chargé en P ainsi préparé, utilisé pour l'assainissement des sols, peut constituer une bonne source de nutriments pour les cultures et augmenter leur rendement. La cinétique de libération des éléments nutritifs à partir de ces engrais. Dietrich et al., (2020) ont préparé du biochar vierge en utilisant des épis de maïs et en les pyrolysant à 450°C. Ensuite, afin d'enrichir le biochar en éléments nutritifs, il a été enveloppé dans un tissu en polypropylène et immergé dans un digestat d'ensilage de maïs contenant 0,53 % de N et 0,71 % de K. Le Biochar vierge (témoin) et Le biochar chargé en nutriments ont été utilisés comme additif au sol à une dose de 5 %, et le maïs (*Zea mays L.*) a été utilisé comme plante test. L'ajout de biochar enrichi au sol a plus que doublé la biomasse végétale par rapport au témoin. De plus, lors de l'utilisation de biochar chargé en nutriments, la quantité de N biodisponible pour les plantes dans le sol a été considérablement augmentée. Il convient de noter que l'application d'une dose aussi élevée de biochar sur le sol n'est pas pratique et recommandée. Ces études sont donc difficilement comparables aux résultats pour des doses standard d'engrais commerciaux. Tang et al., (2019) ont

obtenu un biochar vierge par pyrolyse de boues de digesteur anaérobie à 350–550 °C. Le biochar a été enrichi en nutriments en étant trempé dans une solution synthétique d'ions NH_4^+ ou une solution d'eaux usées municipales réelles (effluent primaire). La concentration de $\text{NH}_4^+ \text{N}^-$ dans les deux solutions était de 45 mg L⁻¹. Les résultats ont montré que la capacité d'adsorption la plus élevée des solutions était obtenue par le biochar obtenu à 450 °C (1,4 mg g⁻¹). Des résultats similaires ont été obtenus pour les eaux usées brutes. Cependant, certaines différences ont été notées entre l'adsorption de la solution et les eaux usées réelles. Des recherches plus poussées ont montré (Tang et al., 2019) que les biochars chargés en N peuvent être utilisés avec succès comme engrais efficaces fournissant aux plantes du N biodisponible.

I-2-5- Le biochar et les organismes du sol

Le biochar affecte l'activité et la structure microbiennes des sols. Les principaux facteurs influençant l'impact du biochar sur les éléments vivants du sol sont l'adsorption, le pH du sol et les propriétés physiques du biochar telles que la porosité, la surface spécifique et son association avec la matière minérale. Les modifications de disponibilité en carbone et en divers nutriments grâce au biochar ont parfois tendance à augmenter et parfois à diminuer la biomasse microbienne, et ce selon trois critères : la disponibilité des éléments du sol avant l'ajout de biochar, l'ampleur des modifications dues au biochar et les groupes de microorganismes. Dans la plupart des cas étudiés cependant, l'ajout de biochar a pour effet d'augmenter la biomasse microbienne (Lehmann et al., 2011). Les effets du biochar sur la disponibilité des nutriments pour les microorganismes sont donc très variables en fonction des études (Warnock et al., 2010). En augmentant la CEC, la capacité d'adsorption du sol, en améliorant le pH et en apportant des nutriments, le biochar a un potentiel de fertilisation irréfutable (Lehmann et al., 2011). Des études portant sur du biochar issu de produits bovins présentent des augmentations de respiration et de quotient métabolique, résultant probablement d'une concentration en nutriments, notamment en phosphore et azote, ainsi qu'une proportion en carbone labile plus importante (Kolb et al., 2009). Cependant, selon certaines études le biochar occasionne une moindre accessibilité des nutriments pour le microbiome, et pourrait de ce fait favoriser une diminution de la déminéralisation de carbone et donc d'émission de CO₂ (Lehmann et al., 2011) (Anders et al., 2013). Néanmoins, plusieurs études démontrent que la moindre accessibilité engrange au contraire un changement dans les communautés des microorganismes, qui se réorganisent en favorisant les espèces capables d'accéder à la matière

organique récalcitrante (Khodadad et al., 2011) (Bamminger et al., 2014). S'en suivrait une amélioration de l'utilisation des ressources localisées dans et autour du biochar. La biomasse microbienne augmenterait alors, et son activité serait soutenue et stimulée, accélérant la décomposition de la matière organique du sol, et l'émission de CO₂ (Lehmann et al., 2011).

Avec l'augmentation de la masse microbienne, les activités enzymatiques changent, elles aussi. Ces variations induisent des effets sur la croissance végétale, sur certains pathogènes, ainsi que sur les cycles d'autres éléments biogéochimiques (Ameloot et al., 2013). Grâce à la présence de matières organiques et de microorganismes sur le biochar, ces derniers parviennent à mieux exploiter le carbone, et ce sans avoir besoin de produire des enzymes minéralisantes. A cela est corrélé une diminution de respiration, et donc d'émission de CO₂. Cette coprésence de microorganismes et de MO dans les mêmes microenvironnements est favorisée par les microparticules de biochar, permettant une croissance des microorganismes plus efficace (Lehmann et al., 2011). D'un autre côté, le biochar pourrait renfermer la matière organique d'une manière telle qu'il ne serait plus possible pour des exo enzymes d'y avoir accès (Liang et al., 2010) (Lehmann et al., 2011).

Le biochar a des effets différents selon les communautés d'organismes. Il semblerait que le biochar induise une abondance de bactéries, car suite à leur accrochage sur la surface de celui-ci leur lessivage est amoindri. Par contre, les communautés fongiques ne seraient que faiblement impactées par l'ajout de biochar (Pietikäinen et al., 2003). La prédominance d'un de ces groupes de microorganismes par rapport à l'autre pourrait influencer la production de CO₂ (Lehmann et al., 2011). L'immobilisation s'effectue par attraction hydrophobique, par des forces électrostatiques ou par adhésion, en fonction de la taille des pores, de la proportion de cendres et de la fraction (Rivera-Utrilla et al., 2001) (Lehmann et al., 2011). Les champignons et les bactéries sont mieux protégés de leurs prédateurs et compétiteurs grâce aux pores du biochar (Lehmann et al., 2011), accentuant l'importance du rôle des pores et de leurs tailles (Cassidy et al., 1996) (Rivera-Utrilla et al., 2001). Il est à préciser que les effets positifs du biochar sur un type de communautés ne certifie pas qu'il aura des effets positifs sur un autre (Lehmann et al., 2011).

I-3- Utilisation du digestat pour l'amélioration du sol

I-3-1-Comment produit-on le digestat ?

La formation du digestat résulte de la méthanisation des déchets organiques (biomasse), généralement dans des conditions mésophiles (~40°C) et dans un environnement sans oxygène, avec un temps de séjour compris entre 20 et 60 jours (Figure 2). Une fois le processus de digestion terminé, le digestat est stocké dans une fosse appelée chambre de sortie ou de stockage.

Le digestat produit lors du procédé de méthanisation peut être séparé sous format d'un digestat solide et d'un digestat liquide. La fraction solide du digestat est réputée pour son contenu élevé en matière organique présentant une importante proportion de carbone stabilisé. Elle contiendrait environ 18 fois moins d'azote minéral que le digestat brut (Reibel, 1901a). La fraction liquide, elle, se caractérise par une teneur en azote minéral plus importante que dans la phase solide, et par la présence de fractions organiques plus labiles (jusqu'à 90% de minéralisation du carbone organique). Cette fraction liquide est également plus infiltrable dans le sol de par sa faible teneur en matière sèche (Reibel, 1901a).

Le digestat résulte de la digestion de différents types de matières premières :

- Biodéchets (déchets alimentaires)
- Effluents d'élevage (fumier, lisier)
- Sous-produits des industries agroalimentaires
- CIVE (Cultures Intermédiaires à Vocation Energétique)
- Résidus de culture

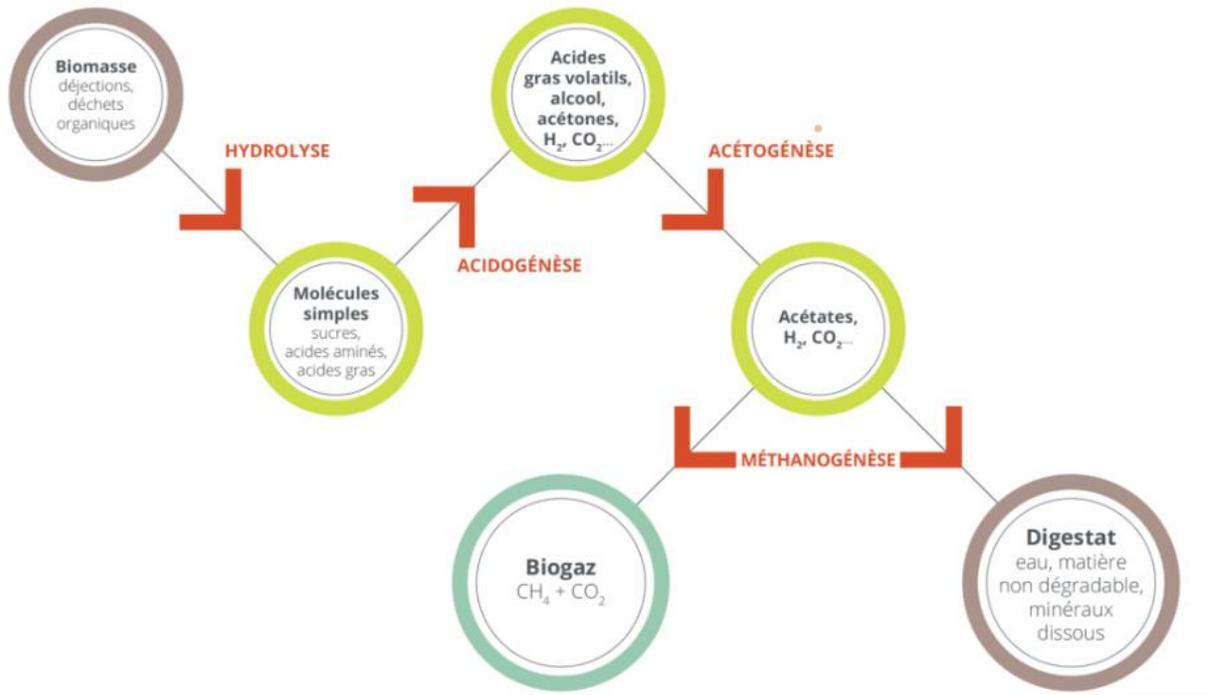


Figure 2: Production de digestat (Arkolia Énergies – Les atouts du digestat de méthanisation, 2022)

I-3-2- Valorisation agronomique du digestat : effet sur les cycles de carbone et d’azote dans les agrosystèmes

Une fois le digestat apporté au sol (Figure 3), une partie du carbone organique qu’il contient est dégradée par la microflore du sol et se minéralise sous forme de CO₂ en tant que source d’énergie. Le reste s’incorpore à la MO du sol, en guise de réserve pour éviter des pertes par lessivage de carbone dissous. L’azote apporté par le digestat se trouve sous forme organique (N org) et surtout minérale (NH₄⁺). Le NH₄⁺ se nitrifie formant ainsi du NO₃⁻ assimilable par les plantes mais dont une partie pourra être lessivée. Au cours de la nitrification et de la dénitrification du NO₃⁻, des émissions de N₂O peuvent avoir lieu. La dénitrification peut également être favorisée par la présence de C organique facilement biodégradable dans les digestats.

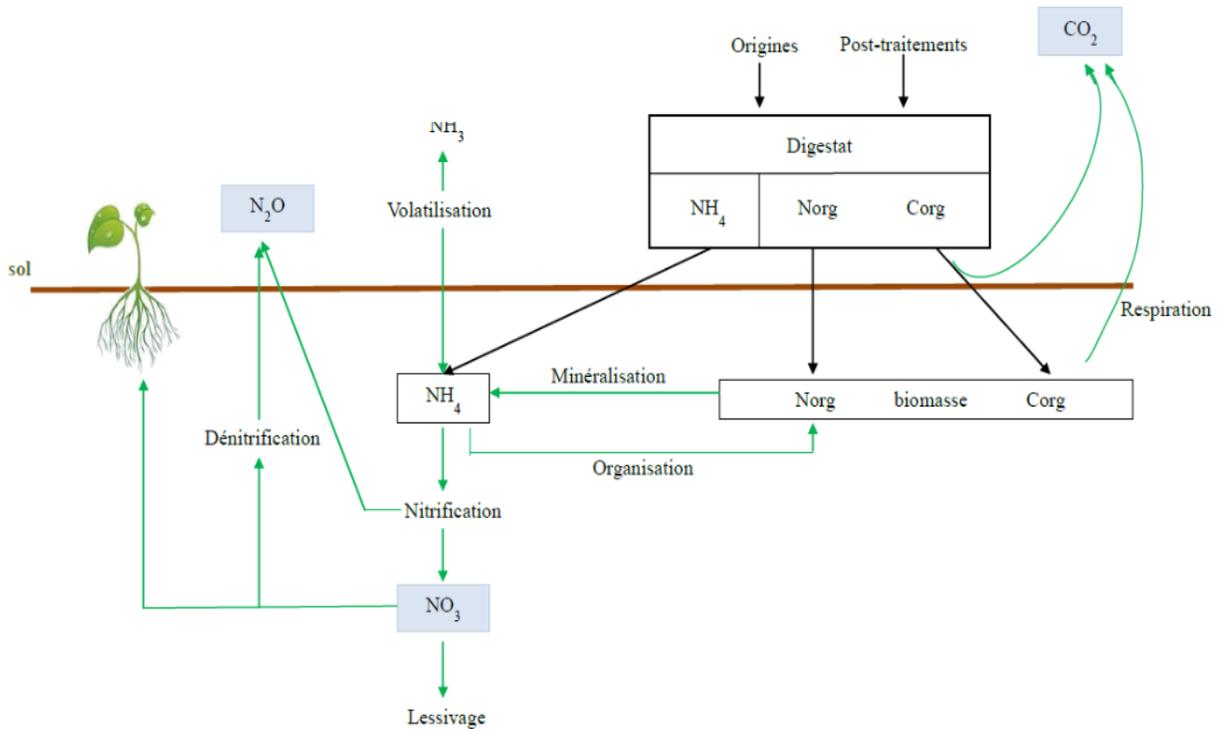


Figure 3: Effet du digestat sur les cycles de carbone et d'azote (Reibel, 1901b)

I-3-3- Effet du digestat sur les propriétés du sol

Après épandage, le devenir de la matière organique présente dans les digestats est fortement dépendant du contexte pédoclimatique et de la diversité des organismes présents dans le sol. La littérature fait en grande majorité état d'une augmentation de l'activité microbienne du sol (Albuquerque et al., 2012) (D. J. Ross et al., 1989) En effet, l'épandage de digestat apporte une source d'énergie carbonée supplémentaire renforçant ainsi l'activité microbienne du sol avec la production de nouvelles cellules. De même, Voelkner et al., (2017) ont également rapporté une amélioration de la CRE après incorporation du digestat dans différents sols sableux et argileux – limoneux, et cela malgré leur postulat de base (la méthanisation produit comme intermédiaires des acides gras qui peuvent amplifier le caractère hydrophobe du sol). Ce phénomène peut s'expliquer selon les auteurs ainsi qu'Hallett et al. (2002) par le ratio champignons/bactéries décroissant. En effet, un fort développement des communautés fongiques peut provoquer un effet hydrofuge. Or ce sont surtout les communautés bactériennes qui semblent se développer le plus en présence du digestat (Voelkner et al., 2019).

I-3-4-Etat de nos connaissances sur l'impact des digestats

Actuellement, peu de données scientifiques sont disponibles pour rendre général l'impact positifs des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Certaines études suggèrent qu'un apport de digestat augmente la biomasse et l'activité microbienne des sols (Odlare et al., 2008). A l'inverse, d'autres travaux ne rapportent aucun effet des digestats de méthanisation sur ces mêmes paramètres (Andruschkewitsch et al., 2013) (Johansen et al., 2013). Ces divergences de résultats peuvent s'expliquer par des variabilités de facteurs expérimentaux (type de digestats, quantité apportée, type de sol...). Concernant la structure des communautés microbiennes du sol, l'ensemble des études s'accordent à mettre en évidence qu'un apport de digestat induit une modification de cette dernière (García-Sánchez et al., 2015). L'apport de digestat au sol aurait tendance à favoriser la population bactérienne du sol en augmentant sa croissance et sa diversité (Walsh et al., 2012) (Sapp et al., 2015). A l'inverse, les champignons, eux, tireraient peu de bénéfices de cette pratique, puisque l'apport de digestat au sol n'aurait pas d'effet sur la croissance de la population fongique, et aurait même un effet négatif sur la structure de cette communauté (Wentzel & Joergensen, 2016). Concernant l'impact des digestats sur la macrofaune du sol, peu de données sont également disponibles dans la littérature scientifique. Il semble cependant que l'apport de digestats induise une augmentation de la biomasse et de l'abondance des vers de terre au niveau des sols agricoles (Koblenz et al., 2015). Ces résultats ne représentent pas un consensus, puisqu'une autre étude démontre l'effet délétère des digestats de méthanisation sur les vers de terre (C.-L. Ross et al., 2017). Pour résumer, que l'on considère les micro- ou les macro-organismes du sol, les résultats disponibles dans la littérature scientifique sont à ce jour contradictoires ; chaque étude rapportant des effets propres à des digestats particuliers, appliqués dans des conditions expérimentales uniques, rendant les conclusions actuelles peu génériques. D'autre part, à notre connaissance, très peu d'études recensent, après plusieurs années d'apports consécutifs, l'impact des digestats de méthanisation sur la biologie du sol (SADET-BOURGETEAU et al., 2020) . Pour l'ensemble des raisons évoquées ci-dessus, les données issues de la littérature scientifique ne permettent pas à ce jour d'objectiver l'impact des digestats de méthanisation sur la qualité biologique des sols. Il est donc nécessaire d'acquérir encore de nouvelles connaissances pour permettre la mise en évidence de relations génériques.

I-3-5-Co-application du digestat et du biochar sur le sol

L'application du digestat au sol a montré des effets bénéfiques : réduction de la densité apparente, augmentation de la conductivité hydraulique, capacité de rétention de l'eau (Garg et al., 2005) et stabilité des agrégats (Holatko et al., 2021). Le digestat peut augmenter la teneur en matière organique (humus) (Holatko et al., 2021) et soutenir les activités microbiennes dans le sol. Cependant, la teneur en carbone (C) du digestat peut diminuer au cours de la digestion anaérobie et entraîner un apport réduit de C organique dans le sol par rapport à la fertilisation avec des fumiers ou par rapport à l'incorporation directe de résidus de culture non digérés (Holatko et al., 2021). Des amendements organiques riches en C comme le biochar susceptibles de séquestrer le C (Z. Khan et al., 2020) pourraient être appliqués avec le digestat et compenser cet inconvénient par une stabilisation plus élevée du C (Breunig et al., 2019) et de N (Chen et al., 2021). Il a été rapporté que l'amendement du digestat et du biochar augmentait à la fois le carbone organique total (COT) et le renouvellement du C du sol par rapport à la seule application de digestat (Hewage & Priyadarshani, 2016). Néanmoins, d'autres auteurs ont évoqué la réduction des composés solubles (C organique dissous et phénols) due à l'ajout de biochar au digestat. Cela a réduit la biomasse et l'activité du microbiote du sol (Cardelli et al., 2018) ou ralenti la minéralisation et la libération des nutriments adsorbés par le biochar dans l'application à court terme (Kizito et al., 2019). Ces effets temporaires de la co-application du digestat et du biochar sur le sol entraînent une légère baisse du rendement (Kizito et al., 2019), de la biomasse aérienne et du prélèvement total de N (Holatko et al., 2021). Néanmoins, l'effet prolongé du biochar sur le digestat pourrait entraîner un puits de C du sol plus élevé en augmentant la teneur en COT (Cardelli et al., 2018). Il pourrait apporter l'avantage de maintenir la fertilité du sol, une teneur élevée en MOS et de libérer progressivement des micronutriments (Kizito et al., 2019).

Conclusion

Le biochar, produit par pyrolyse de la biomasse lignocellulosique, suscite un intérêt croissant en tant qu'amendement des sols grâce à ses nombreux avantages potentiels pour l'agriculture, ainsi qu'à sa capacité à séquestrer le carbone dans le sol. La fraction solide du digestat issu de la digestion anaérobie est un substrat riche en azote bien connu. Le co-compostage du biochar et du digestat a le potentiel d'augmenter de manière synergique la valeur agronomique des deux composants, mais

il nécessite davantage de processus et de recherche sur le terrain. Cependant, une utilisation de char pour le traitement du sol à la place de la chaux est souhaitée.

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

Dans ce chapitre nous allons présenter le matériel utilisé tels que : le pH-mètre, les amendements, un conductimètre et un spectrophotomètre ; et les méthodes déployées lors de l'expérimentation.

II-1-Matériel

II-1-1-Les sols

Au cours de l'expérience, deux types de sols ont été testés : l'un est un sol sableux (sable pris dans un terrain de football) et l'autre est un sol cultivable (sol pris dans les locaux de l'université).

- ❖ Un sol sableux est généralement défini comme un sol très aéré avec des macropores, il est souvent sec, pauvre en éléments nutritifs et très drainant. Il est peu (ou pas du tout) apte à transporter l'eau jusqu'aux couches profondes.



Figure 4: Photo d'un Sol sableux

- ❖ Un sol cultivable est caractérisé par sa richesse en minéraux, en vers de terre, en champignons et en bactéries qui contribuent au recyclage de la matière organique et maintiennent une bonne porosité.



Figure 5: Photo d'un sol cultivable

II-1-2-Les amendements

Le biochar et le digestat ont été les deux types d'amendements organiques utilisés dans ce travail :

- ❖ Biochar à base de l'herbe et des branches d'arbre : nous avons utilisée de l'herbe, des morceaux de bout de bâton d'arbre pour faire la carbonisation. La température de pyrolyse a été fixée à 500°C, pendant une durée de 20 minutes. Nous avons utilisé le four à moufle pour effectuer les tests de pyrolyse.

Le char obtenu est présenté sur la photo ci-dessous (figure 6).



Figure 6 : Photo de Biochar

- ❖ Digestat de bouse de vache prélevé au biodigesteur du Laboratoire de Chimie et de Physique des Matériaux de l'université Assane Seck de Ziguinchor. Nous avons utilisé le digestat sec (figure 7) pour l'amendement de sol.



Figure 7 : Photo de Digestat

II-1-3-Un pH-mètre

Il est important d'évaluer les niveaux de pH du sol au moyen d'une analyse du sol. Un principe d'une bonne gestion du sol consiste à ajuster le pH du sol dans la plage optimale des cultures, puis de s'attaquer aux problèmes de fertilité du sol. L'analyse du sol par le pH-mètre du laboratoire de chimie a été le seul moyen fiable de déterminer si le pH devrait être ajusté. La fourchette optimale de pH du sol pour la plupart des cultures est de 6,0 à 7,5.



Figure 8: pH-mètre HANNA HI 9811-5 (Portable Multiparameter Meters, 2023)

II-1-4-Le Spectrophotomètre à UV-Visible

Pour réaliser une analyse qualitative et quantitative de chaque solution des huit traitements, un spectrophotomètre (GENESYS™ 10S UV-VIS) à double faisceau du laboratoire d'Agroforesterie de l'université a été utilisé. Ce spectrophotomètre permet d'avoir l'absorbance de chaque solution c'est-à-dire connaître la quantité de lumière absorbée par chaque solution sur toute la gamme des longueurs d'onde de 190nm à 1100nm dans le domaine de l'ultraviolet et du visible de façon rapide, fiable et précise.



Figure 9: Spectrophotomètre Genesys 10S UV-Vis (GENESYS™ 10S UV-Visible Spectrophotometers, Thermo Fisher Scientific, 2023)

II-1-5-Un Conductimètre CO 3000L

L'amendement ne se fait pas sans pour autant assurer le suivi de certains aspects du sol alors quelques paramètres sont mesurés par le conductimètre du laboratoire de Chimie Physique des Matériaux :

- La conductivité électrique : permet de savoir dans quelle mesure une substance peut transmettre un courant électrique grâce à de petites particules ou ions (chargés positivement ou négativement) qui aident à transporter celui-ci. La conductivité est proportionnelle à la quantité d'ions disponible.

- La salinité : permet de connaître la teneur en sel dans un sol, et savoir quelle culture est appropriée.
- TDS (total des solides dissous) : est la quantité de substances dissoutes en solution. Cette mesure lit toutes les substances inorganiques et organiques dissoutes dans un liquide.



Figure 10: Conductimètre pHenomenal™ VWR3000L

II-2-Méthode

II-2-1-Protocole du pH-mètre

Une solution de chaque traitement a été prélevée dans des pots puis mesurée avec un pH-mètre. Le principe d'utilisation de ce dernier se déroule de la manière suivante :

- ❖ Mettre le bout de l'électrode du pH-mètre dans un capuchon rempli de solution ionique KCl pour l'empêcher de se dessécher ;
- ❖ Allumer l'appareil qui est à la fois un pH-mètre et un conductimètre ;
- ❖ Enlever le capuchon protecteur de l'électrode ;
- ❖ Rincer avec de l'eau distillée le bout de l'électrode ;
- ❖ Essuyer l'électrode avec un mouchoir ;
- ❖ Introduire l'électrode dans une solution tampon de pH= 7,00 ;
- ❖ Régler avec le curseur du bouton pH l'affichage sur 7,00 ;

- ❖ Introduire encore l'électrode dans une solution acide de pH= 4,00 ;
- ❖ Régler avec le curseur du bouton pH l'affichage sur 4,00 ;
- ❖ Essuyer l'électrode avec un mouchoir, le pH-mètre est alors prêt à effectuer des mesures ;
- ❖ Introduire l'électrode de mesure dans la solution à mesurer et l'agiter pendant quelques secondes ;
- ❖ Lire la valeur du pH sur le cadran ;
- ❖ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée à chaque fois qu'elle est introduite dans une solution ;
- ❖ Remettre l'électrode dans le capuchon contenant de KCl quand les mesures sont terminées.

II-2-2-Protocole d'utilisation du Conductimètre

Après les prélèvements sur les différents échantillons, le conductimètre est utilisé suivant ce mode :

- ❖ Visser le pied de statif à la face inférieure de l'appareil de mesure en serrant bien ;
- ❖ Raccorder la cellule de mesure à l'appareil de mesure ;
- ❖ Calibrer ou contrôler l'appareil de mesure avec la cellule de mesure ;
- ❖ Mettre la cellule de mesure dans une solution avant le début des mesures ;
- ❖ Rincer la cellule de mesure avec de l'eau distillée ;
- ❖ Puis on introduit la cellule de mesure dans la solution à mesurer ;
- ❖ Appuyer sur le bouton MODE pour sélectionner la grandeur à mesurer ;
- ❖ Et après chaque mesure il est obligatoire de rincer la cellule de mesure avec de l'eau distillée.

II-2-3-Application des amendements

L'amendement s'est fait sur les deux types de sols avec quatre traitements suivant ce schéma :

Sol sableux

Sol sableux

Sol sableux

Sol sableux

Sol cultivable

Sol cultivable

Sol cultivable

Sol cultivable

- Sols sans amendements (témoin)
- Sols amendés avec 13% de Biochar
- Sols amendés avec 13% de Digestat
- Sols amendés avec 6,4% de Biochar et 6,4% de Digestat

Les six traitements ont une masse de 217 g chacun, pour chaque amendement pris séparément une masse de 28 g a été utilisée donc 13% de la masse de sol utilisé. Et pour les sols avec des fertilisants combinés une masse de 14 g pour chacun des deux types d'amendements a été utilisée soit 6,4% de la masse de sol. Un suivi de 28 jours a été fait ; chaque semaine des prélèvements d'échantillon se faisaient sur les six traitements. Enfin des mesures de certains paramètres se faisaient et une comparaison s'observe avec les analyses des deux sols témoins.

II-2-4-Protocol du Spectrophotomètre à UV-Visible

Après prélèvement des différents échantillons alors la mesure de l'absorbance se procède de la manière suivante :

- ❖ Allumer le spectrophotomètre ;
- ❖ Nettoyer les cuvettes ou cellules ;
- ❖ Essuyer les cuvettes ;
- ❖ Préparer un blanc c'est-à-dire le solvant qui n'est rien d'autre que l'eau de robinet ;
- ❖ Régler les longueurs d'ondes (500nm et 1100nm) ;
- ❖ Verser le bon volume de blanc dans la cuvette ;
- ❖ Calibrer l'appareil avec le blanc : placer la solution de contrôle dans le port-cuvette et fermer le couvercle pour la mise à zéro de l'appareil et les mesures s'affichent sur l'écran ;
- ❖ Verser le blanc ;
- ❖ Mesurer l'absorbance de chaque échantillon.

II-2-5-Mesure des paramètres

II-2-5-1-Mesure du pH

Chaque semaine un pH-mètre est utilisé ; pour déterminer le pH de chaque type de sols, des prélèvements se faisaient sur les six échantillons et ils étaient mélangés avec de l'eau pour obtenir des solutions. Ensuite l'électrode du pH-mètre est immergée dans chaque solution pour déterminer le pH des différents échantillons.

II-2-5-2-Mesure de la conductivité électrique, du TDS et de la salinité

Sur un intervalle de temps d'une semaine des prélèvements se faisaient sur les six échantillons. Après prélèvements, les échantillons étaient mélangés dans de l'eau puis décantés des minutes plus tard dans un récipient et grâce au conductimètre phenomenalTM VWR 3000L la conductivité électrique, le TDS et la salinité de chaque sol sont mesurés.

II-2-5-3-Mesure de l'absorbance

Chaque semaine un prélèvement se faisait sur les six traitements afin de déterminer l'absorbance sur deux longueurs d'ondes différentes 500nm et 1100nm. Les échantillons étaient prélevés dans des pots puis ils sont mélangés avec de l'eau. Et ils sont laissés des heures plus tard pour pouvoir les décanter ensuite les filtrer quelques minutes plus tard avec du papier filtre de type flat filter diam 110 mm Le filtrat pour en garder que les filtrats. Ces derniers sont mis dans une cellule en verre puis l'absorbance est calculée en plaçant la cellule dans le port-cuvette du spectrophotomètre.

Conclusion

Plusieurs matériels ont été utilisés dans ce chapitre avec différentes méthodes. Ce qui nous a permis d'aboutir à des résultats et discussions qui feront l'objet du dernier chapitre de notre travail.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

Durant toute la phase d'expérimentation plusieurs paramètres tels que : l'absorbance, le pH, la conductivité électrique, le TDS et la salinité ont fait l'objet de certaines mesures tout au long des 28 jours après amendement (JAA) afin d'avoir des résultats conduisant à une éventuelle discussion.

III-1-Résultats

III-1-1-Effet des traitements sur la conductivité électrique

Les résultats de la Conductivité Electrique obtenus sont listés dans le Tableau1 et le Tableau A1 de l'annexe. Nous avons noté une augmentation considérable après application des différents traitements (Figure 11) durant les 28 JAA par rapport aux sols témoins (Tableau 1). A l'exception du sol 1 traité avec 13% biochar pour qui la valeur de la conductivité diminue au 14^{ième} JAA pour ensuite la voir augmenter les deux semaines qui suivent. Pour les sols 1 et 2 amendés avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat la valeur de la conductivité augmente progressivement chaque semaine de même que pour le sol 2 traité avec 13% de biochar. Et enfin pour les sols amendés avec 13% de digestat la conductivité a augmenté progressivement tout au long des 28 JAA, et elle augmente significativement en atteignant d'importante valeur.

Tableau 1: La valeur de la conductivité des deux sols témoins

Sols témoins	Sol 2	Sol 1
Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	83,3	75,9

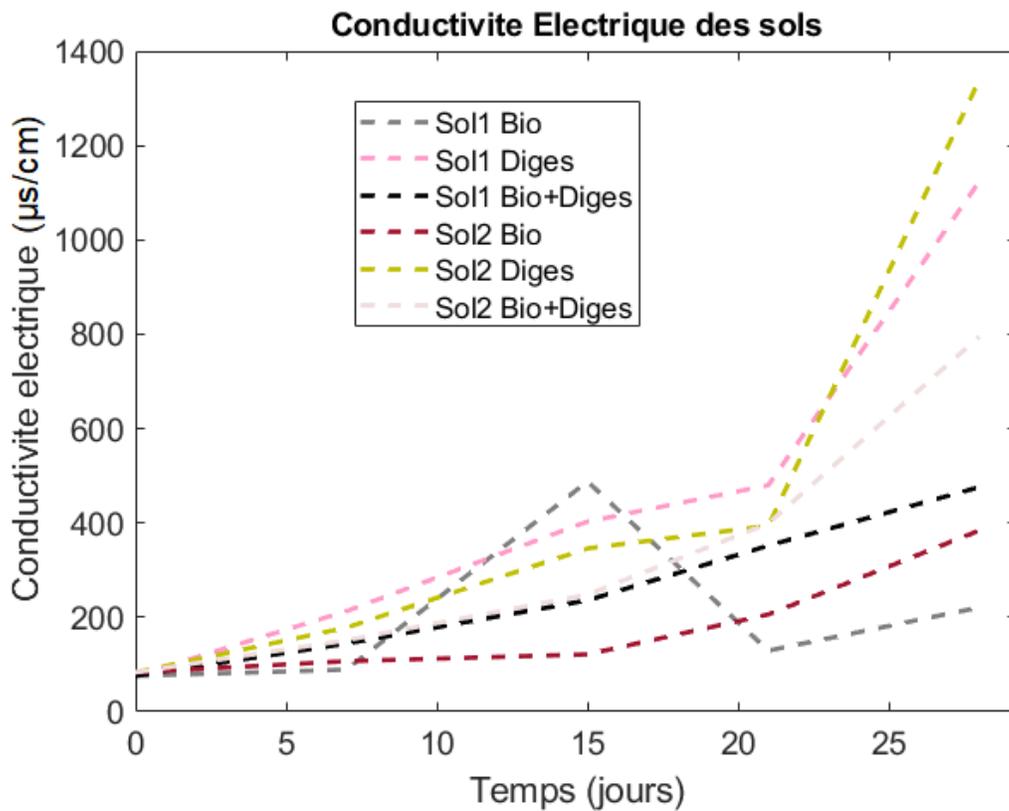


Figure 11: Courbe d'évolution de la Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des substrats en fonction du nombre de JAA

III-1-2-Effet des traitements sur la salinité

La salinité des sols est déterminée à l'aide du conductimètre et les résultats relevés sont tabulés dans les Tableaux 2 et A2. Les deux sols témoins (Tableau 2), comme pour les sols amendés (voir Figure 12) aux sept premiers jours, présentent une quantité de salinité nulle. Au 14^{ème} JAA, des traces de sels ont été notées pour les sols traités avec 13% de digestat et ceux traités avec 6,4% de

biochar et 6,4% de digestat. Pour le 21^{ème} JAA, on constate qu'il n'y'a aucune trace de sel pour tous les sols traités à l'exception de ceux traités avec 13% digestat.

Tableau 2: La valeur de la salinité des deux sols témoins

Sols témoins	Sol 2	Sol 1
Salinité	0	0

En revanche au 28^{ème} JAA tous les sols traités présentent des traces de salinité sauf pour le sol1 traité avec 13% de biochar ; néanmoins la présence des traces de salinité est plus importante pour les sols fertilisés avec 13% de digestat.

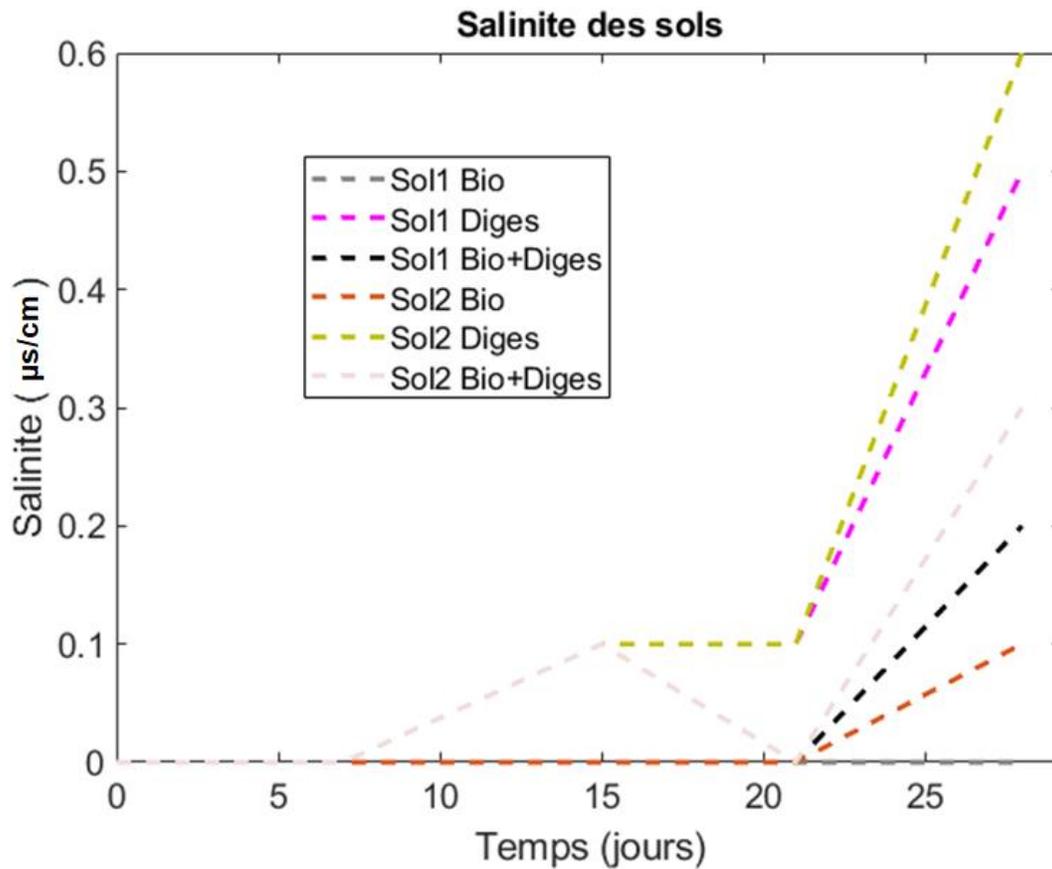


Figure 12: Courbe d'évolution de la Salinité des substrats en fonction du nombre de JAA

III-1-3-Effet des traitements sur le TDS

Le TDS (total de solides dissous) déterminé par le même conductimètre que celui de la conductivité et de la salinité a permis d'obtenir les résultats des Tableaux 3 et A3. Comparé aux deux sols témoins (voir Tableau 3) les deux types de sols amendés avec 13% de biochar (voir Figure 13) durant les 14 JAA la valeur du TDS a diminué pour ensuite augmenter les deux semaines qui suivent c'est-à-dire entre le 21^{ième} et le 28^{ième} JAA. Pour les deux types de sols traités avec 13% de digestat et ceux traités avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat la valeur du TDS augmente tout au long de la durée de l'expérience et plus précisément les plus importantes valeurs du TDS sont obtenues au 28^{ième} JAA avec les sols traités avec 13% de digestat.

Tableau 3: La valeur du TDS des deux sols témoins

Sols témoins	Sol 2	Sol 1
TDS (mg /L)	81	73

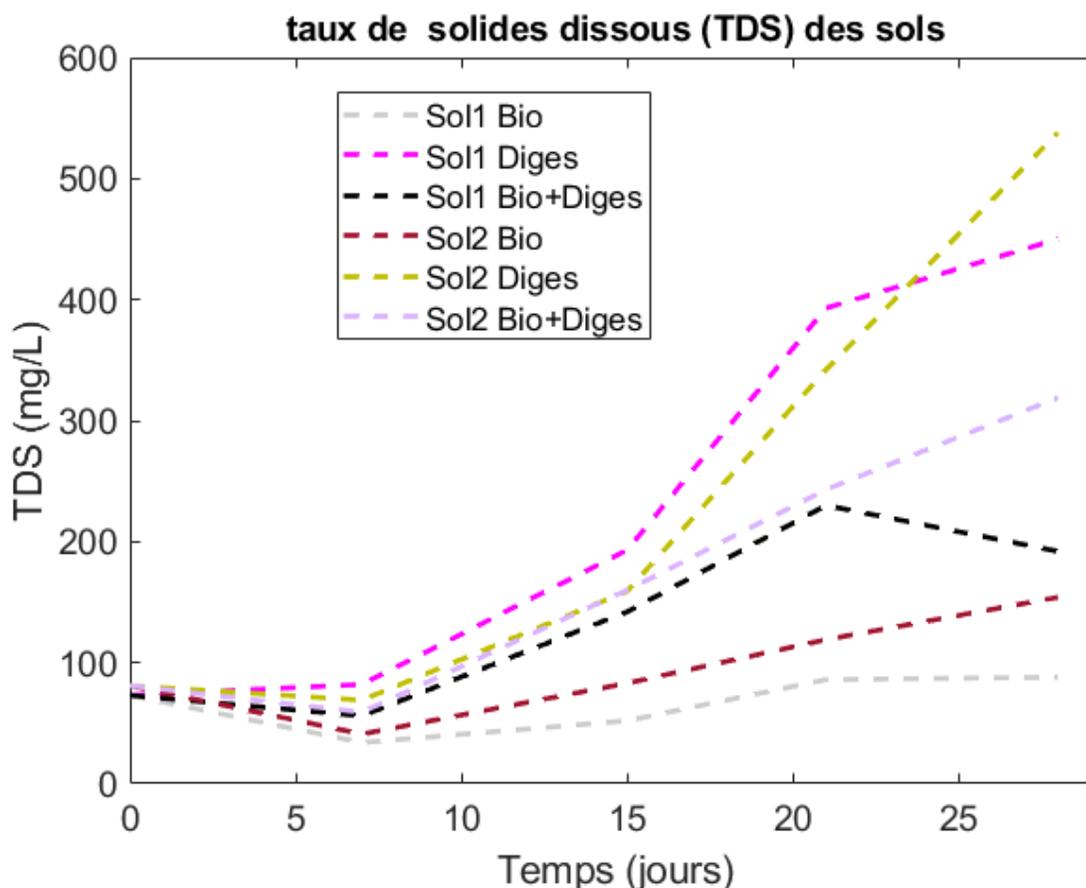


Figure 13: Courbe d'évolution du TDS (mg/L) des substrats en fonction du nombre de JAA

III-1-4-Effet des traitements sur le pH

Le pH déterminé à l'aide du pH-mètre nous a permis d'avoir les résultats listés dans les tableaux 4 et A4. Les pH des deux types de sols et des biofertilisants (voir Tableau 4) sont acides. Par contre au 7^{ième} JAA (voir Figure 14) le pH des deux sols traités a viré au basique à l'exception des sols traités avec 13% de biochar. A partir du 14^{ième} JAA le pH des sols traités tend au sensiblement basique durant toute l'expérience à l'exception du sol 2 traité avec 13% de biochar qui tend à être acide au 28^{ième} JAA.

Tableau 4 : La valeur du pH des deux sols témoins et des deux amendements

Sols témoins et amendements	Sol 2	Sol 1	Biochar	Digestat
pH	6	5,5	7	7

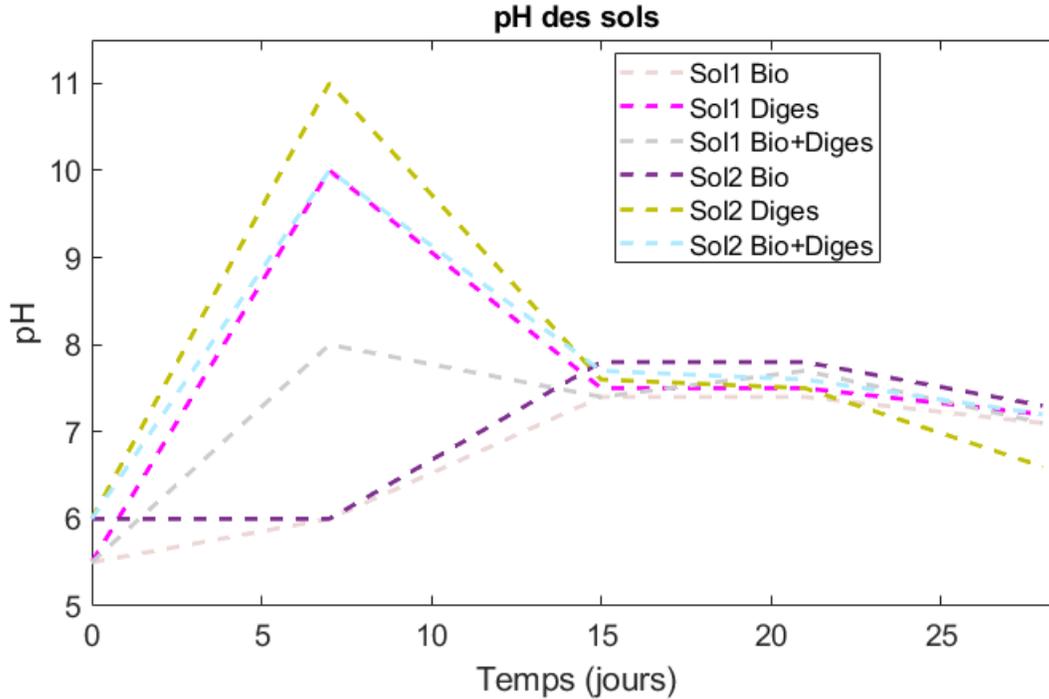


Figure 14 : Courbe d'évolution du pH des substrats en fonction du nombre de JAA

III-1-5-Effet des traitements sur l'absorbance

A l'aide du spectrophotomètre UV-Vis l'absorbance a été calculée suivant deux longueurs d'ondes à 500 nm et 1100 nm et les résultats obtenus sont regroupés dans les Tableaux 5, A5, 6 et A6.

A 500nm l'absorbance des deux sols témoins (Tableau 5) est plus élevée que celle des substrats traités au 7^{ième} et 14^{ième} JAA (voir Figure 15). Par contre pour les deux types de sols amendés avec 13% de digestat et le sol 2 fertilisé avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat l'absorbance de ces échantillons atteint sa valeur maximale au 21^{ième} JAA. Pour les deux types de sols amendés avec 13% de biochar et le sol 1 fertilisé avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat la valeur de l'absorbance est plus importante au 28^{ième} JAA et aussi on obtient la valeur la plus significative de l'absorbance avec le sol 1 amendé avec 13% de biochar pour tous les sols traités.

Tableau 5 : La valeur de l'absorbance des deux sols témoins à 500nm

Sols témoins	Sol 2	Sol 1

Absorbance	0,943	1,176
------------	-------	-------

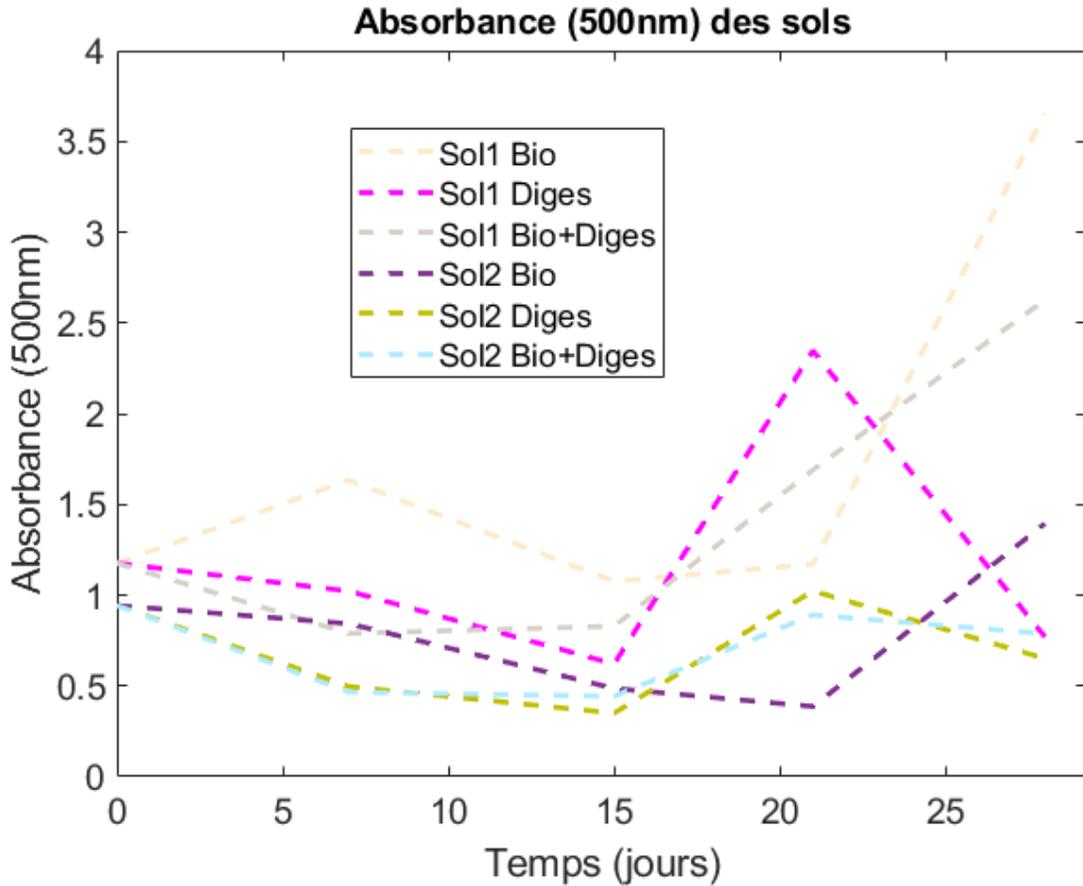


Figure 15 : Courbe d'évolution d'absorbance à 500nm des substrats en fonction du nombre de JAA

A 1100nm l'absorbance est plus faible comparée à celle obtenue à 500nm. Nous constatons que les substrats du sol 1 (voir Tableau 6) ont des valeurs d'absorbance beaucoup plus faible que le sol 1 témoin (voir Figure 16). Par contre nous constatons pour le substrat du sol 2 traités avec 13% de biochar que son absorbance dépasse celui du sol 2 témoin le 21^{ème} JAA pour ensuite décroître vers une valeur beaucoup plus faible. Et pour les substrats du sol 2 traités avec 13% de digestat et celui avec 6,4% de biochar et 6,4% de digestat ils atteignent une valeur d'absorbance maximale au 28^{ème} JAA.

Tableau 6 : La valeur de l'absorbance des deux sols témoins à 1100nm

Sols témoins	Sol 2	Sol 1
Absorbance	0,240	0,568

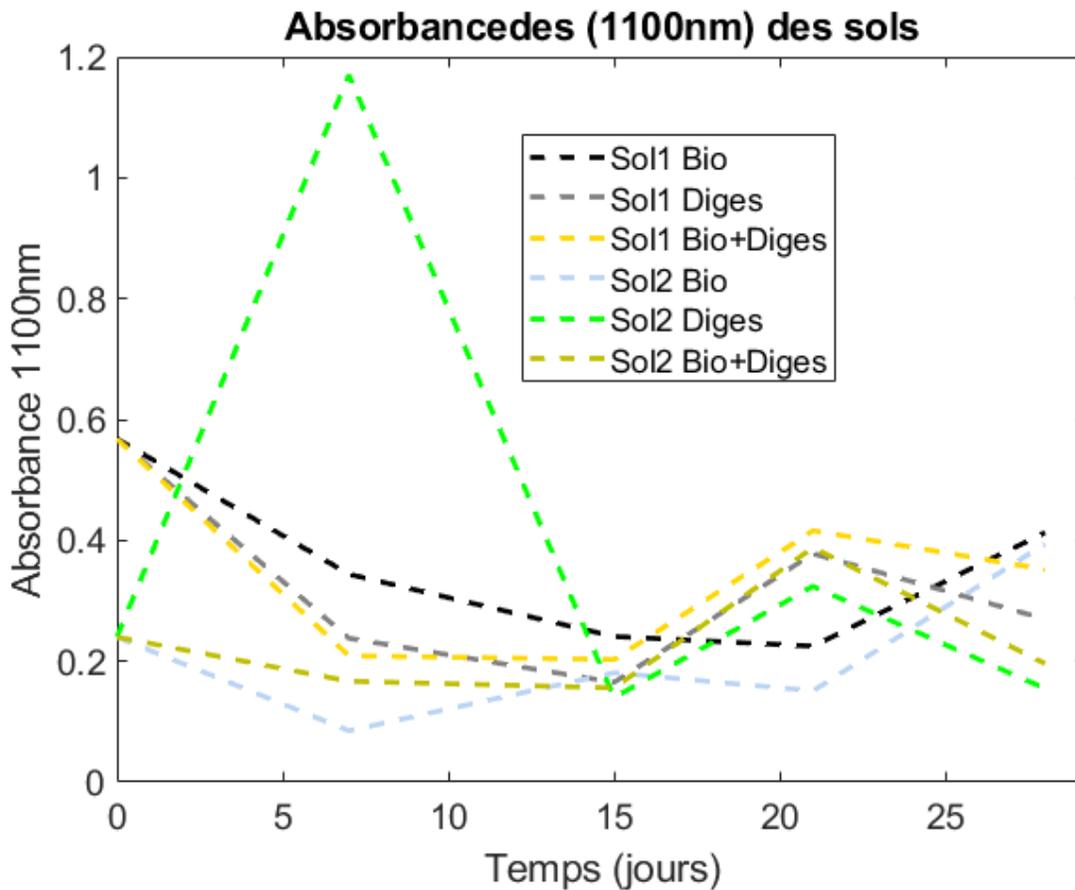


Figure 16 : Courbe d'évolution d'absorbance à 1100nm des substrats en fonction du nombre de JAA

Par contre une remarque a été faite que ça soit pour les deux longueurs d'ondes choisies ou les types d'amendements faits sur les deux types de sol ; on note la valeur de l'absorbance est plus importante pour le sol cultivable que pour celle du sol sableux.

III-2-Discussion

III-2-1-Effet des amendements sur les propriétés physico-chimiques des substrats

❖ Effet du Biochar

Sous l'effet du biochar, le pH des sols amendés devient dans cette étude plus alcaline qu'à leur état initial. Le biochar en augmentant le pH du sol permet non seulement de résoudre le problème d'acidité mais aussi permet au sol d'avoir une charge nette négative et de retenir plus d'éléments fertilisants. La presque majorité des biochars produits sont alcalins avec des pH variant de 7-10 comme le cas de notre biochar avec un pH neutre. En effet la température de pyrolyse influence grandement les propriétés physico-chimiques et la structure du biochar. Par exemple, pour un biochar provenant de résidus de colza fabriqué sous deux températures de pyrolyse (400 °C et 700 °C), le biochar à 700 °C possédait un plus fort contenu en carbone stable, un pH plus élevé, une porosité et une concentration minérale (Cu^{2+} , Zn^{2+} , etc.) beaucoup plus importantes (Angin & Şensöz, 2014). L'alcalinité observée dépend de la proportion des cendres ainsi que des groupements carboxyliques observés dans chaque type de biochar. Ces cendres qui sont riches en carbonates (fumier) ou anions organiques concourent après leur hydrolyse à la neutralisation de l'acidité du sol et au relèvement du pH (Glaser et al., 2001). À part son alcalinité, le biochar possède une excellente porosité autant au niveau des macropores que des micropores et une faible masse volumique apparente (Novak et al., 2009). Par ailleurs, la conductivité électrique mesurée au niveau des substrats du biochar indique que la plupart des horizons reste dans les limites de sols non salins ($\text{EC} < 500 \mu\text{s}/\text{cm}$) selon la classification de Durand J-H (1983) (Bouka et al., 2020). Pour modifier les propriétés chimiques du sol le biochar augmente la CEC et améliore la fertilité du sol grâce à la disponibilité de nutriments essentiels et bénéfiques pour la plante. La CEC élevée trouvée dans les substrats amendés avec du biochar est due à la surface spécifique attribuable au biochar lui donnant un excellent potentiel d'adsorption vis-à-vis des polluants organiques et inorganiques des sols (Liang et al., 2006) ce qui est en accord avec les valeurs du TDS. Compte tenu de ses propriétés physiques et chimiques particulières, le biochar influence donc le pH, la conductivité électrique, la salinité, le TDS, la texture, la structure, la porosité, la taille et la distribution des pores ainsi que la masse volumique apparente du sol dans lequel il est incorporé (Zhang et al., 2016).

❖ Effet du digestat

La neutralité du pH du digestat montre une augmentation de la CEC alors il est considéré comme un fertilisant relativement mûr donc il sera facilement digérable. Or le pH d'un compost mûr se situe normalement entre 7-8 (Garcia et al., 1992), voire entre 7-9. Soumaré et al., (2002) affirment que les substrats de culture devraient avoir une faible conductivité électrique inférieure à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Au-delà de cette norme, des répercussions négatives pourraient avoir lieu sur la germination et l'émergence des semences. Dans notre cas pour les deux types de sols amendés avec du digestat ; la conductivité maximale des substrats est l'ordre de 1339 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

D'après la classification de Durand J-H (1983) la conductivité des substrats du digestat maximale est dans la plage de [1000-2000] $\mu\text{S}/\text{cm}$ donc on est dans la classe III avec une qualité des sols qui est salée. Ce sont principalement les cations Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- et SO_4^{2-} qui sont fréquemment présents dans les sols salés. La teneur élevée en sel affecte la croissance des végétaux qui peut résulter des brûlures aux racines et aux feuillages. Il faut garder en mémoire que les plantes s'enracinent mieux dans un substrat contenant peu d'éléments nutritifs (Grogga et al., 2018). En effet, une valeur élevée de la CE du digestat représente une grande quantité d'ions en solution tel que l'azote minéral. L'azote ammoniacal qui n'est ni converti ni utilisé lors de la digestion anaérobie, s'adsorbe plus facilement par les plantes, même s'il a un effet toxique. Pour un digestat sec, la matière organique constitue plus de 80 % de la matière sèche. Les fractions organiques stables qui contribuent à l'entretien de la matière organique des sols sont importantes (65 % et plus) (*Digestat séché Séchage de la fraction solide ou du digestat brut*, 2015). Le rapport C/N de ce produit est plus ou moins élevé (de 15 à 30), tandis que la proportion d'azote minéral est faible (> 5 % de N total), le séchage entraînant la perte par volatilisation de plus de 75 % (voire jusqu'à 100 %) de l'azote ammoniacal. Néanmoins les digestats séchés intégralement peuvent contenir une part non négligeable de matières organiques solubles à dégradation rapide dans le sol, pouvant le cas échéant générer une « faim en azote ». Cette dernière est un apport organique trop riche en carbone et fermentescible (donc avec un ratio C/N élevé) peut conduire à une activité biologique excessive, provoquant la consommation par les microorganismes, d'une partie de l'azote du sol. Il peut alors se passer une compétition entre ce prélèvement d'azote par la microflore et les besoins en N de la plante (par exemple, au moment du démarrage d'une nouvelle culture). Le digestat agit sur les propriétés physiques des substrats en impactant sur la porosité et la structure (pénétration de

l'eau et de l'air ; Stockage de l'eau ; réchauffement) et sur les propriétés chimiques en influençant sur la CEC, la dégradation et la minéralisation (fourniture d'éléments minéraux, stockage et disponibilité des éléments minéraux...).

❖ Effet combiné biochar-digestat

D'après la classification de Durand J-H (1983) la conductivité des substrats du digestat combiné au biochar est dans la gamme [500-1000] $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une qualité de sol légèrement salée ceci peut être justifiée du fait que le biochar est arrivé à saturation. Nos résultats indiquent que les valeurs du TDS et de la CEC sont comprises entre celles du biochar et celles du digestat cela peut être due à l'impact des deux types de biofertilisants sur les sols. A l'inverse de l'azote N, le phosphore P est généralement sous forme solide dans le digestat brut, transformé en phosphate de calcium et struvite. Une étude a fait état de la diminution du taux de minéralisation cumulée de N dans le sol amendé par le digestat avec un rapport C/N élevé (Steiner et al., 2008) servant à caractériser l'état de décomposition de la MO . Bien que les digestats enrichis en biochar aient diminué l'azote total, ils avaient le potentiel de stabiliser et de séquestrer les nutriments, y compris le N-ammonium (N-NH_4), une forme répandue de N disponible pour les plantes dans le digestat, de la même manière qu'il a été rapporté (Yao et al., 2012). Certaines études ont rapporté une augmentation du rendement des cultures en raison de l'application de digestat avec un amendement organique riche en C (c'est-à-dire du biochar) (Shahbaz et al., 2019). La documentation de ces études fait référence à des propriétés partiellement améliorées du biochar grâce au co-traitement du digestat (Reibe et al., 2015), y compris une meilleure disponibilité des nutriments (M. A. Khan et al., 2020). Cependant, même ces études n'ont pas démontré qu'un meilleur accès aux nutriments pourrait entraîner une augmentation du rendement des cultures (Zubair et al., 2021).

III-2-2-Effet des amendements sur les propriétés minérales des substrats

L'amendement en biochar des sols a entraîné une augmentation significative des concentrations minérales dans le sol des macroéléments (NO_3^- , P) et des oligo-éléments (Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+}). Plusieurs études abondent dans le même sens, comme quoi le biochar favorise une rétention en nutriments dans le sol en améliorant les propriétés physiques du sol et en augmentant le contenu minéral (Lehmann & Joseph, 2009). En effet, en modifiant la masse volumique apparente du sol, en neutralisant le pH, en augmentant la CEC et en améliorant la distribution des particules du sol, l'ajout de biochar au sol permet une meilleure rétention en nutriments ce qui est en accord avec nos

résultats pour le pH comme pour l'absorbance. En se référant à la figure 15 nous avons une forte présence d'éléments minéraux dans les sols traités avec du biochar. Nemati et al., (2015) ont avancé que le biochar peut même être considéré comme une alternative à la perlite dans les substrats horticoles. Les auteurs ont montré que l'ajout de biochar à différents types de substrats horticoles améliore les propriétés physiques du sol et engendre des concentrations minérales plus importantes (NO_3^- , K^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} et Zn^{2+}). Toutefois, lors de notre étude le biochar utilisé a augmenté la CEC (tableaux 1A et 2A) et a été une source d'absorption de nutriments (Tableaux 4A et 6A) et d'adsorption de certains éléments polluants du sol (Islam et al., 2021). Les quantités totales en éléments fertilisants N, P, K et des oligo-éléments sont donc conservées dans le digestat obtenu et sont très variables en fonction des intrants. La teneur en MO, en macro et micronutriments du digestat dépend de l'origine des matières organiques et du procédé de digestion utilisé. La production d'ion hydroxyde (OH^-) corrélatif à celle d'ammonium élève le pH du milieu, ce qui affirme la caractéristique basique du digestat comme le répertorient les résultats de nos analyses (Tableau 2A). La CE peut constituer une indication sur la disponibilité des éléments minéraux dans le milieu de culture alors la présence de celui-ci est plus importante dans les amendements faits avec le digestat ce qui corroborent avec nos résultats. Le digestat utilisé a un rapport C/N élevé, riche en MO et en élément phosphaté.

Conclusion

En somme d'après les résultats obtenus, le biochar et le digestat utilisés séparément ou ensemble ont eu des effets positifs sur bon nombre de paramètres des sols à amender. Donc l'amendement avec les biofertilisants s'avère être une solution durable pour le secteur agricole. Même si la connaissance de l'effet du digestat à long terme reste à savoir.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

En somme, cette étude était portée sur l'amendement de deux types de sols avec deux types de biofertilisants qui sont le biochar et le digestat. Nous nous sommes rendu compte que le biochar peut traiter et fertiliser le sol comparé au digestat dont le rôle se limite à la fertilisation du sol. L'analyse des résultats acquis au cours de cette présente étude a révélé que la fertilisation avec du biochar comme du digestat ont eu des effets positifs pour la correction du pH des milieux amendés. L'incorporation du biochar a permis aussi d'obtenir les valeurs d'absorbances les plus élevées avec le sol cultivable. Par contre la valeur de CEC la plus importante est obtenu avec les sols qui ont eu comme amendement le digestat suivi de ceux fertilisés avec du digestat combiné au biochar conduisant ainsi à la salinité des sols.

Il s'avère important de mentionner que les effets du biochar et du digestat sur les sols ne peuvent être généralisés puisqu'ils sont spécifiques au type de matières premières utilisées, à la culture et au type de sol amendé. En effet, bien que le biochar ait présenté plusieurs avantages à son potentiel comme amendement au sol, ses propriétés varient beaucoup selon ses conditions de fabrication lui procurant des propriétés bien spécifiques. Concernant les digestats, même si leur efficacité comme fertilisants ou amendements a souvent été démontrée, des études soulignent certains risques environnementaux. Parmi eux, on peut noter une hausse potentielle des émissions de NH_3^+ par rapport à l'application de matières organiques non digérées (Nkoa, 2014). De même, la concentration d'oligo-éléments (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Mn^{2+}) issus des effluents porcins et bovins est susceptible d'avoir des effets secondaires toxiques sur les sols agricoles (Nkoa, 2014).

En perspective il serait souhaitable de continuer cette étude en se focalisant sur ces points ci-dessous :

- ❖ Bonne maîtrise des matières premières à pyrolyser pour avoir un char de meilleures propriétés physico-chimiques pour l'amendement ;
- ❖ Utilisation du digestat brut pour l'amendement dans le but d'éviter de perdre un certain pourcentage de l'azote et avoir un ratio C/N faible ;
- ❖ Des matériels pour permettre d'analyser et de détecter la présence de nouveaux éléments présents dans les sols avant et après fertilisation ;

Faire une étude à partir de la phase amendement du sol à la phase récolte pour pouvoir déceler l'impact des biofertilisants sur la santé de la population, sur les sols et sur la rentabilité des cultures en respectant certaines normes européennes.

BIBLIOGRAPHIE

- Albuquerque, J. A., de la Fuente, C., & Bernal, M. P. (2012). Chemical properties of anaerobic digestates affecting C and N dynamics in amended soils. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *160*, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.007>
- Ameloot, N., Graber, E. R., Verheijen, F. G. A., & De Neve, S. (2013). Interactions between biochar stability and soil organisms : Review and research needs. *European Journal of Soil Science*, *64*(4), 379-390. <https://doi.org/10.1111/ejss.12064>
- Anders, E., Watzinger, A., Rempt, F., Kitzler, B., Wimmer, B., Zehetner, F., Stahr, K., Zechmeister-Boltenstern, S., & Soja, G. (2013). Biochar affects the structure rather than the total biomass of microbial communities in temperate soils. *Agricultural and Food Science*, *22*(4), Art. 4. <https://doi.org/10.23986/afsci.8095>
- Anderson, C. R., Condrón, L. M., Clough, T. J., Fiers, M., Stewart, A., Hill, R. A., & Sherlock, R. R. (2011). Biochar induced soil microbial community change : Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, *54*(5), 309-320. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2011.07.005>
- Andruschkewitsch, M., Wachendorf, C., & Wachendorf, M. (2013). Effects of digestates from different biogas production systems on above and belowground grass growth and the nitrogen status of the plant-soil-system. *Grassland Science*, *59*(4), 183-195. <https://doi.org/10.1111/grs.12028>
- Angin, D., & Şensöz, S. (2014). Effect of Pyrolysis Temperature on Chemical and Surface Properties of Biochar of Rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Phytoremediation*, *16*. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.856842>

- Arkolia Énergies – Les atouts du digestat de méthanisation. (2022, avril 20). <https://arkolia-energies.com/digestat-de-methanisation-engrais-fertilisant/>
- Bamminger, C., Zaiser, N., Zinsser, P., Lamers, M., Kammann, C., & Marhan, S. (2014). Effects of biochar, earthworms, and litter addition on soil microbial activity and abundance in a temperate agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, 50(8), 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0968-x>
- Bouka, E., Ganyo, K., Ablede, K., Mathe, E., & Sogbedji, J. (2020). *Caractérisation de l'état de salinité des sols et des eaux du site maraîcher de Atti-Apédokoe dans la préfecture de l'Avé au Togo*.
- Breunig, H. M., Amirebrahimi, J., Smith, S., & Scown, C. D. (2019). Role of Digestate and Biochar in Carbon-Negative Bioenergy. *Environmental Science & Technology*, 53(22), 12989-12998. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03763>
- Bridgwater, A. V., Meier, D., & Radlein, D. (1999). An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, 30(12), 1479-1493. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(99\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(99)00120-5)
- Cardelli, R., Giussani, G., Marchini, F., Saviozzi, A., Cardelli, R., Giussani, G., Marchini, F., & Saviozzi, A. (2018). Short-term effects on soil of biogas digestate, biochar and their combinations. *Soil Research*, 56(6), 623-631. <https://doi.org/10.1071/SR18017>
- Cassidy, M. B., Lee, H., & Trevors, J. T. (1996). Environmental applications of immobilized microbial cells : A review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 16(2), 79-101. <https://doi.org/10.1007/BF01570068>
- Chen, J., Jiang, X., Tang, X., Sun, Y., & Zhou, L. (2021). Use of biochar/persulfate for accelerating the stabilization process and improving nitrogen stability of animal waste digestate. *Science of The Total Environment*, 757, 144158. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144158>
- de Preneuf, F. (2022, septembre 30). *Agriculture et alimentation*. World Bank. <https://www.banquemondiales.org/fr/topic/agriculture/overview>

- Dietrich, C. C., Rahaman, M. A., Robles-Aguilar, A. A., Latif, S., Intani, K., Müller, J., & Jablonowski, N. D. (2020). Nutrient Loaded Biochar Doubled Biomass Production in Juvenile Maize Plants (*Zea mays* L.). *Agronomy*, *10*(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/agronomy10040567>
- Digestat séché Séchage de la fraction solide ou du digestat brut.* (2015). AILE - CS 56520 - 35065 RENNES Cedex - info@aile.asso.fr - Tél : 02 99 54 63 23
- Ding, Y., Liu, Y., Liu, S., Li, Z., Tan, X., Huang, X., Zeng, G., Zhou, L., & Zheng, B. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *36*(2), 36. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>
- Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P. (2009). Physical Properties of Biochar. In *Biochar for Environmental Management*. Routledge.
- Garcia, C., Hernández, T., Costa, F., Ceccanti, B., & Ciardi, C. (1992). Changes in ATP content, enzyme activity and inorganic nitrogen species during composting of organic wastes. *Canadian Journal of Soil Science*, *72*(3), 243-253. <https://doi.org/10.4141/cjss92-023>
- García-Sánchez, M., Siles, J. A., Cajthaml, T., García-Romera, I., Tlustoš, P., & Száková, J. (2015). Effect of digestate and fly ash applications on soil functional properties and microbial communities. *European Journal of Soil Biology*, *71*, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.08.004>
- Garg, R. N., Pathak, H., Das, D. K., & Tomar, R. K. (2005). Use of Flyash and Biogas Slurry for Improving Wheat Yield and Physical Properties of Soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, *107*(1), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10661-005-2021-x>
- Gaunt, J. L., & Lehmann, J. (2008). Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. *Environmental Science & Technology*, *42*(11), 4152-4158. <https://doi.org/10.1021/es071361i>

GENESYS™ 10S UV-Visible Spectrophotometers, Thermo Fisher Scientific. (2023). VWR.

<https://ca.vwr.com/store/product/en/4952743/genesystem-10s-uv-visible-spectrophotometers-thermo-fisher-scientific>

Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The « Terra Preta » phenomenon : A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, *88*(1), 37-41.

<https://doi.org/10.1007/s001140000193>

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, *35*(4), 219-230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>

Groga, N., Diomande, M., Beugre, G. A. M., Ouattara, Y., & Akaffou, D. S. (2018). Étude comparative de la qualité de la symbiose (*Anabaena azollae*, *Azolla caroliniana*), du compost et du NPK sur la croissance végétative et le rendement de la tomate (*Lycopersicon esculentum* mill. Solanacée) à Daloa (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, *129*, 13004-13014.

<https://doi.org/10.4314/jab.v129i1.4>

Hewage, S., & Priyadarshani, R. (2016). *Effect of charred digestate (biochar) and digestate on soil organic carbon and nutrients in temperate bioenergy crop production systems* [DoctoralThesis, Staats- und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky]. <https://ediss.sub.uni-hamburg.de/handle/ediss/6679>

Holatko, J., Hammerschmiedt, T., Kintl, A., Danish, S., Skarpa, P., Latal, O., Baltazar, T., Fahad, S., Akça, H., Taban, S., Kobzova, E., Datta, R., Malicek, O., Hussain, G. S., & Brtnicky, M. (2021). Effect of carbon-enriched digestate on the microbial soil activity. *PLOS ONE*, *16*(7), e0252262.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252262>

Influence du pH sur le potentiel de fertilité des sols cultivés. (s. d.). Consulté 4 janvier 2023, à l'adresse

<https://www.jardinprovence.com/fr/acidite-alcalinite.html>

- Islam, M. A., Jacob, M. V., & Antunes, E. (2021). A critical review on silver nanoparticles : From synthesis and applications to its mitigation through low-cost adsorption by biochar. *Journal of Environmental Management*, 281, 111918. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111918>
- Jardiner Autrement. (2016, mai 2). *Les caractéristiques du sol : Texture, structure, pH... - Jardiner Autrement*. <https://www.jardiner-autrement.fr/teneur-sol-matiere-organique/>
- Johansen, A., Carter, M. S., Jensen, E. S., Hauggard-Nielsen, H., & Ambus, P. (2013). Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO₂ and N₂O. *Applied Soil Ecology*, 63, 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.09.003>
- Khan, M. A., Mahmood-ur-Rahman, Ramzani, P. M. A., Zubair, M., Rasool, B., Khan, M. K., Ahmed, A., Khan, S. A., Turan, V., & Iqbal, M. (2020). Associative effects of lignin-derived biochar and arbuscular mycorrhizal fungi applied to soil polluted from Pb-acid batteries effluents on barley grain safety. *Science of The Total Environment*, 710, 136294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136294>
- Khan, Z., Zhang, K., Khan, M., Fahad, S., Xu, Z., & Hu, L. (2020). Coupling of Biochar with Nitrogen Supplements Improve Soil Fertility, Nitrogen Utilization Efficiency and Rapeseed Growth. *Agronomy*, 10. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111661>
- Khodadad, C. L. M., Zimmerman, A. R., Green, S. J., Uthandi, S., & Foster, J. S. (2011). Taxa-specific changes in soil microbial community composition induced by pyrogenic carbon amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(2), 385-392. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.005>
- Kim, J.-S., Sparovek, G., Longo, R. M., De Melo, W. J., & Crowley, D. (2007). Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 684-690. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.010>

- Kizito, S., Luo, H., Lu, J., Bah, H., Dong, R., & Wu, S. (2019). *Role of Nutrient-Enriched Biochar as a Soil Amendment during Maize Growth : Exploring Practical Alternatives to Recycle Agricultural Residuals and to Reduce Chemical Fertilizer Demand*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3211>
- Koblenz, B., Tischer, S., Rücknagel, J., & Christen, O. (2015). Influence of biogas digestate on density, biomass and community composition of earthworms. *Industrial Crops and Products*, 66, 206-209. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.024>
- Kolb, S. E., Fermanich, K. J., & Dornbush, M. E. (2009, juillet 1). *Effect of Charcoal Quantity on Microbial Biomass and Activity in Temperate Soils—Kolb—2009—Soil Science Society of America Journal—Wiley Online Library*. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2008.0232>
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar Impact on Nutrient Leaching from a Midwestern Agricultural Soil. *Geoderma*, 158, 436-442. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Lateef, A., Nazir, R., Jamil, N., Alam, S., Shah, R., Khan, M. N., Saleem, M., & Rehman, S.-. (2019). Synthesis and characterization of environmental friendly corncob biochar based nano-composite – A potential slow release nano-fertilizer for sustainable agriculture. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 11, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2019.100212>
- Laurin-Lanctôt, S. (2015). *Rétention en nutriments, activité biologique et régie de fertilisation*. 146. *Le sol : Un écosystème à part évoluant sous nos pieds*. (s. d.). Conservation Nature. Consulté 4 janvier 2023, à l'adresse <https://www.conservation-nature.fr/ecosysteme/sol/>
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2)

- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management : Science and technology*. Earthscan.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Leinweber, P., & Schulten, H.-R. (1999). Advances in analytical pyrolysis of soil organic matter. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 49(1), 359-383. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(98\)00082-5](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(98)00082-5)
- Liang, B., Lehmann, J., Sohi, S. P., Thies, J. E., O'Neill, B., Trujillo, L., Gaunt, J., Solomon, D., Grossman, J., Neves, E. G., & Luizão, F. J. (2010). Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*, 41(2), 206-213. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2009.09.007>
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J., & Neves, E. G. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Major, J., Steiner, C., Downie, A., & Lehmann, J. (2009). Biochar Effects on Nutrient Leaching. In *Biochar for Environmental Management*. Routledge.
- Massemin, E. (2015, mars 13). *Climat : L'agriculture est la source d'un quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre*. Reporterre, le média de l'écologie. <https://reporterre.net/Climat-l-agriculture-est-la-source>
- Mathieu, C. (2020, mai 15). *La dégradation des sols en France et dans le monde, une catastrophe écologique ignorée*. Planet-Vie. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/la-degradation-des-soFrancefrance-et-dans>

- Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma*, 193-194, 122-130.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.002>
- Nemati, M. R., Simard, F., Fortin, J.-P., & Beaudoin, J. (2015). Potential Use of Biochar in Growing Media. *Vadose Zone Journal*, 14(6), vzj2014.06.0074. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.06.0074>
- Nkoa, R. (2014). Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates : A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 473-492.
<https://doi.org/10.1007/s13593-013-0196-z>
- Novak, J., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J., Steiner, C., Das, K. C., & Schomberg, H. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Ann. Environ. Sci*, 3, 2-3.
- Odlare, M., Pell, M., & Svensson, K. (2008). Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues. *Waste Management*, 28(7), 1246-1253.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.005>
- Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., & Fritze, H. (2003, avril 22). *Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus—Pietikäinen—2000—Oikos—Wiley Online Library*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1034/j.1600-0706.2000.890203.x>
- Portable Multiparameter Meters*. (2023). <https://hannasingapore.com/products/portable-meters/multiparameter>
- Pudasaini, K., Ashwath, N., Walsh, K., & Bhattarai, T. (2012). Biochar Improves Plant Growth and Reduces Nutrient Leaching in Red Clay Loam and Sandy Loam. *Hydro Nepal: Journal of Water, Energy and Environment*, 11. <https://doi.org/10.3126/hn.v11i1.7221>

- Reibe, K., Roß, C.-L., & Ellmer, F. (2015). Hydro-/Biochar application to sandy soils : Impact on yield components and nutrients of spring wheat in pots. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(8), 1055-1060. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.977786>
- Reibel, A. (1901a). *Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? Revue de littérature*. 63.
- Reibel, A. (1901b). *Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? Revue de littérature*. 63.
- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Rivera-Utrilla, J., Bautista-Toledo, I., Ferro-García, M. A., & Moreno-Castilla, C. (2001). Activated carbon surface modifications by adsorption of bacteria and their effect on aqueous lead adsorption. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 76(12), 1209-1215. <https://doi.org/10.1002/jctb.506>
- Ross, C.-L., Wilken, V., Krück, S., Nielsen, K., Sensel-Gunke, K., & Ellmer, F. (2017). Assessing the impact of soil amendments made of processed biowaste digestate on soil macrofauna using two different earthworm species. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(14), 1939-1950. <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1316380>
- Ross, D. J., Tate, K. R., Speir, T. W., Stewart, D. J., & Hewitt, A. E. (1989). Influence of biogas-digester effluent on crop growth and soil biochemical properties under rotational cropping. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 17(1), 77-87. <https://doi.org/10.1080/01140671.1989.10428013>
- SADET-BOURGETEAU, S., MARON, P.-A., & RANJARD, L. (2020). *Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils : Results from growth-chamber and*

field experiments—ScienceDirect.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139310001654>

Sapp, M., Harrison, M., Hany, U., Charlton, A., & Thwaites, R. (2015). Comparing the effect of digestate and chemical fertiliser on soil bacteria. *Applied Soil Ecology*, *86*, 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.004>

Shahbaz, A. K., Adnan Ramzani, P. M., Saeed, R., Turan, V., Iqbal, M., Lewińska, K., Abbas, F., Saqib, M., Tauqeer, H. M., Iqbal, M., Fatima, M., & Rahman, M. (2019). Effects of biochar and zeolite soil amendments with foliar proline spray on nickel immobilization, nutritional quality and nickel concentrations in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *173*, 182-191.

<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.025>

Sohi, S. P. (2012). Carbon storage with benefits. *Science*, *338*(6110), 1034-1035.

Soumaré, M., Demeyer, A., Tack, F. M. G., & Verloo, M. G. (2002). Chemical characteristics of Malian and Belgian solid waste composts. *Bioresource Technology*, *81*(2), 97-101.

[https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00125-0](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00125-0)

Steiner, C., Glaser, B., Geraldtes Teixeira, W., Lehmann, J., Blum, W. E. H., & Zech, W. (2008). Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *171*(6), 893-899.

<https://doi.org/10.1002/jpln.200625199>

Tang, Y., Alam, M. S., Konhauser, K. O., Alessi, D. S., Xu, S., Tian, W., & Liu, Y. (2019). Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, *209*, 927-936.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.268>

- Voelkner, A., Diercks, C., & Horn, R. (2017). Compared impact of compost and digestate on priming effect and hydrophobicity of soils depending on textural composition. *SOIL Discussions*, 1-20.
<https://doi.org/10.5194/soil-2016-62>
- Voelkner, A., Diercks, C., & Horn, R. (2019). Compared impact of compost and digestate on priming effect and hydrophobicity of soils depending on textural composition. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, 70(1), 47-57. <https://doi.org/10.2478/boku-2019-0004>
- Walsh, J. J., Rousk, J., Edwards-Jones, G., Jones, D. L., & Williams, A. P. (2012). Fungal and bacterial growth following the application of slurry and anaerobic digestate of livestock manure to temperate pasture soils. *Biology and Fertility of Soils*, 48(8), 889-897.
<https://doi.org/10.1007/s00374-012-0681-6>
- Warnock, D. D., Mummey, D. L., McBride, B., Major, J., Lehmann, J., & Rillig, M. C. (2010). Influences of non-herbaceous biochar on arbuscular mycorrhizal fungal abundances in roots and soils : Results from growth-chamber and field experiments. *Applied Soil Ecology*, 46(3), 450-456.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.09.002>
- Wentzel, S., & Joergensen, R. G. (2016). Effects of biogas and raw slurries on grass growth and soil microbial indices. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 179(2), 215-222.
<https://doi.org/10.1002/jpln.201400544>
- Xiang, A., Qi, R., Wang, M., Zhang, K., Jiang, E., Ren, Y., & Hu, Z. (2020). Study on the infiltration mechanism of molten urea and biochar for a novel fertilizer preparation. *Industrial Crops and Products*, 153, 112558. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112558>
- Yao, Y., Gao, B., Inyang, M., Zimmerman, A. R., Cao, X., Pullammanappallil, P., & Yang, L. (2011). Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings : Characterization and phosphate removal potential. *Bioresource Technology*, 102(10), 6273-6278.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.03.006>

- Yao, Y., Gao, B., Zhang, M., Inyang, M., & Zimmerman, A. (2012). Effect of biochar amendment on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a sandy soil. *Chemosphere*, *89*, 1467-1471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.06.002>
- Zhang, Y., Idowu, O. J., & Brewer, C. E. (2016). Using Agricultural Residue Biochar to Improve Soil Quality of Desert Soils. *Agriculture*, *6*(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/agriculture6010010>
- Zubair, M., Adnan Ramzani, P. M., Rasool, B., Khan, M. A., ur-Rahman, M., Akhtar, I., Turan, V., Tauqeer, H. M., Farhad, M., Khan, S. A., Iqbal, J., & Iqbal, M. (2021). Efficacy of chitosan-coated textile waste biochar applied to Cd-polluted soil for reducing Cd mobility in soil and its distribution in moringa (*Moringa oleifera* L.). *Journal of Environmental Management*, *284*, 112047. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112047>

ANNEXE

Tableau A1 : Evolution de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	89,1	213	144,4	107	178,1	151,2
14 jours	87,9	403	236	121,4	346	248
21 jours	129,3	480	352	206	394	399
28 jours	221	1124	476	384	1339	795

Tableau A2 : Evolution de la salinité des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	0	0	0	0	0	0
14 jours	0	0,1	0,1	0	0,1	0,1
21 jours	0	0,1	0	0	0,1	0
28 jours	0	0,5	0,2	0,1	0,6	0,3

Tableau A3 : Evolution du TDS (mg/L) des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	34	82	56	41	69	59
14 jours	52	193	142	83	159	160
21 jours	86	393	230	119	342	243
28 jours	88	450	192	154	538	319

Tableau A4 : Evolution du pH des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	6	10	8	6	11	10
14 jours	7,4	7,5	7,4	7,8	7,6	7,7
21 jours	7,4	7,5	7,7	7,8	7,5	7,6
28 jours	7,1	7,2	7,1	7,3	6,6	7,2

Tableau A5 : Evolution de l'absorbance à 500 nm des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	1,633	1,022	0,789	0,843	0,497	0,466
14 jours	1,076	0,621	0,829	0,486	0,350	0,443
21 jours	1,171	2,346	1,690	0,387	1,023	0,891
28 jours	3,653	0,770	2,627	1,394	0,651	0,788

Tableau A6 : Evolution de l'absorbance à 1100 nm des deux types de sols en fonction des amendements et du nombre de jours

Types de sols	Sol1 + Biochar	Sol1+ Digestat	Sol1 + Biochar + Digestat	Sol 2 + Biochar	Sol 2 + Digestat	Sol 2 + Biochar + Digestat
7 jours	0,344	0,238	0,209	0,085	0,170	0,167
14 jours	0,241	0,165	0,203	0,181	0,140	0,156
21 jours	0,225	0,378	0,416	0,151	0,324	0,388
28 jours	0,413	0,270	0,352	0,394	0,155	0,196