

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT

SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة العليا للفلاحة بالحراش

Ecole Nationale Supérieure Agronomique El-Harrach, Alger

Thèse

**En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat
en sciences agronomiques**

**Effet de la fertilisation à base de biochar de sciure de
boismélangé au fumier de bovin sur une culture de navet
(*Brassica rapa* L.) conduite en Mitidja**

Présentée par: **M^{me} Nouar Samia**

Devant le Jury composé de:

Président : M^r Daoudi A. Professeur (ENSA)

Rapporteur: M^{me} Baha M. Professeur (ENS)

Co-Rapporteur: M^r Reguieg L. Professeur (ENSA)

Examineurs: M^r Lazali M. MCA (UkM)

M^r Benmoussa M. Professeur (USDB)

Membre Invité: M^r Latati M. MCA (ENSA)

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

D'abord, je remercie en premier lieu l'éternel grand dieu qui m'a aidé à achever ce modeste travail, pour ensuite adresser mes plus sincères remerciements et gratitude à chacun des membres de ma famille qui grâce et sans eux ce travail n'aurait pas vu le jour.

Je tiens à remercier M^{me} Bahia. M professeur à l'ENS, qui m'a fait l'honneur de m'encadrer et de diriger ce travail, pour ses remarques et ses orientations, j'en profite pour lui exprimer ici ma profonde gratitude.

Je remercie M^r Reguieg. L professeur à l'ENSA, qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail notamment sur terrain. Ses conseils et ses orientations m'ont été fort utiles ainsi que ses dimensions académiques et humaines.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à M^r Daoudi. A professeur à l'ENSA, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Mes remerciements vont encore pour M^r Lazali. M professeur à l'UKM et M^r Benmoussa. M Professeur à l'USDB, pour avoir bien voulu accepté de faire partie de mon jury et d'examiner ce travail.

Je remercie M^r Latati. M MCA à l'ENSA, pour son aide et sa disponibilité pour la réalisation des traitements statistiques.

Toute ma gratitude pour M^r Sekhara Belkacem pour ses précieux conseils, ses encouragements, sa gentillesse et sa contribution à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements pour M^r Daoud. Y Professeur à l'ENSA, pour sa gentillesse, ses orientations enrichissantes et sa disponibilité sans limite.

J'adresse toute ma gratitude à M^{me} Abdessamed nesma pour son appui et son indéfectible soutien qui m'a été d'un grand secours et les moments inoubliables passés ensemble.

Un grand merci pou M^r Negri. C directeur de L'INSID et aux membres du laboratoire, pour leur sympathie, particulièrement à ma chère faiza pour son aide et sa gentillesse. Sans oublier M^r Redouane et M^{me} Fatima du laboratoire des sciences du sol pour leur services et aide à tout moment.

Mes sincères remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail de près ou de loin.

Résumé.

Cette étude a eu pour objectif d'évaluer l'effet de plusieurs doses de biochar de bois seul et en mélange avec du fumier de bovin chez le navet (*Brassica rapa* L.) variété « marteau », afin de voir leurs effets positifs ou négatifs sur certains paramètres de croissance à savoir le poids du fruit, le diamètre, la longueur et le poids des feuilles ainsi que leurs effets sur certaines propriétés physico-chimiques de nos sols à savoir la capacité d'échange cationique (CEC), le pH, la densité apparente (DAP) et la matière organique (MO) et aussi les effets sur les concentrations des tissus en certains nutriments ou en éléments chimiques comme l'azote total, le phosphore et le potassium. Le but était surtout de déterminer s'il était envisageable d'introduire le biochar dans les pratiques culturales actuelles dans le cadre d'une perspective de contribution à l'amélioration de la qualité des sols et des rendements des cultures.

Le premier essai a été réalisé en plein champs et en pot, sur un sol à texture limoneuse-argileuse où on a utilisé différentes doses de biochar de sciure de bois seul et en mélange avec le fumier de bovin, les traitements sont les suivants: T1 : B5, T2 : B5*F, T3 : B10, T4 : B10*F, T5 : B20, T6 : B20*F, T7 : F et le T8 : Témoin.

Le deuxième essai était réalisé en pot sur un sol de texture sableuse avec les doses suivantes; T1 : 2/3 sol + 1/3 biochar ; T2 : 2/3 sol + 1/3 fumier ; T3 : 1/3 sol + 1/3 fumier +1/3 biochar ; T4 : 1/2 sol + 1/2 fumier ; T5 : 1/2 sol + 1/2 biochar et T6 : Témoin

Les résultats ont montré que l'apport du biochar seul et en mélange a eu un effet alcalinisant sur le sol en augmentant son pH (1 unité) surtout avec les fortes doses, ceci a entraîné une baisse importante et accru du rendement par rapport au témoin et au fumier. Selon la bibliographie, cette baisse dans le calibre des fruits de navet était attribuée à la diminution de la concentration en phosphore dans les tissus de ces plants qui elle-même été rapporté à l'effet chaulant de notre biochar. L'application du fumier seul a donné les meilleurs résultats pour la production de navet; la combinaison du biochar à 5t/ha semble être la meilleure et la moins néfaste pour le navet par rapport au témoin et à l'apport du biochar seul, fournissant ainsi un effet synergique et d'amorçage positif avec le fumier pour le premier essai.

Pour le deuxième essai, les doses (B2S) et (S3B3) de biochar seul ont eu un impact très négatif sur les différents paramètres du rendement du navet à savoir le poids frais, la longueur, le diamètre du bulbe (plans chétifs à faible poids) par rapport aux traitements du fumier seul, au mélange biochar*fumier et au témoin. Les meilleures résultats ont été enregistrées chez les traitements avec le fumier seul (S3F3) et (S2B2F2), qui ont montré les meilleures performances vu la teneur importante du fumier en éléments nutritifs.

Par ailleurs, les deux essais ont fait ressortir l'effet positif du biochar sur l'amélioration de certaines propriétés physico-chimiques de ces sols comme la matière organique, la capacité d'échange cationique et la densité apparente pour les deux essais.

Les résultats des différents travaux obtenus à travers le monde semblent confirmer la complexité des effets des biochars sur les différentes espèces de cultures utilisées et les processus physico-chimiques des sols par leurs spécificités (matière première) et leur processus de production. Car Il est important de noter que ce n'est pas l'apport de carbone en tant que tel qui est important pour la fertilité des sols, mais plutôt la décomposition de la matière organique qui influe sur la vie du sol et les nutriments nécessaires aux agro écosystèmes pour atteindre l'objectif final.

Mots clés. Biochar de bois, fumier de bovin, sol, nutriments, (*Brassica rapa* L.)

Abstract.

The objective of this study was to evaluate the effect of several doses of wood biochar alone and in mixture with cattle manure in turnip (*Brassica rapa* L.) variety "hammer", in order to see their positive or negative effects on some growth parameters such as fruit weight, diameter, length and weight of leaves as well as their effects on some physicochemical properties of our soils such as cation exchange capacity (CEC), pH, bulk density (BD) and organic matter (OM) and also the effects on tissue concentrations of some nutrients or chemical elements such as total nitrogen phosphorus and potassium. The main goal was to determine if it was possible to introduce biochar in to current cropping practices in order to contribute to the improvement of soil quality and crop yields.

The first trial was carried out in open field and in pot, on a clayey-silt soil where different doses of sawdust biochar were used alone and in mixture with cattle manure, the treatments are the following: T1: B5, T2: B5*F, T3: B10, T4: B10*F, T5: B20, T6: B20*F, T7: F and the T8: Control.

The second trial was carried out in pots on a sandy soil (chap 3) with the following doses: T1: 2/3 soil + 1/3 biochar; T2: 2/3 soil + 1/3 manure; T3: 1/3 soil + 1/3 manure +1/3 biochar; T4: 1/2 soil + 1/2 manure; T5: 1/2 soil + 1/2 biochar and T6: Control.

The results showed that the contribution of biochar alone and in mixture had an alkalizing effect on the soil by increasing its pH (1 unit) especially with the strong doses; this led to an important and increased fall of the output compared to the control and the manure. According to the literature, this decrease in the size of turnip fruits was attributed to the decrease in the concentration of phosphorus in the tissues of these plants, which in turn was related to the liming effect of our biochar. The application of manure alone gave the best results for turnip production; the combination of biochar at 5t/ha appeared to be the best and least detrimental to the turnip compared to the control and the biochar application alone, providing a positive synergistic and priming effect with manure for the first trial.

For the second trial, biochar (B2S) and (S3B3) alone had a very negative impact on the different turnip yield parameters namely fresh weight, length, bulb diameter (stunted plans with low weight) compared to the manure alone, biochar*manure mixture and control treatments. The best results were recorded in the manure only treatments (S3F3) and (S2B2F2), which showed the best performance due to the high nutrient content of manure.

In addition, both trials showed the positive effect of biochar on the improvement of certain physico-chemical properties of these soils such as organic matter, cation exchange capacity and bulk density for both trials.

The results of the different works obtained throughout the world seem to confirm the complexity of the effects of biochar on the different crop species used and the physico-chemical processes of the soils

by their specificities (raw material) and their production process. It is important to note that it is not the carbon input as such that is important for soil fertility, but rather the decomposition of organic matter that influences soil life and the nutrients needed by agro-ecosystems to achieve the final objective.

Key words. Wood biochar, cattle manure, soil, nutrients, (*Brassica rapa* L.)

ملخص.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم تأثير عدة جرعات من الفحم الحيوي للخشب بمفرده ومزجها مع روث الأبقار في صنف اللفت (*Brassica rapa L.*) "المطرقة"، وذلك لمعرفة تأثيرها الإيجابي أو السلبي على بعض معايير النمو. ، وهي وزن الثمرة وقطرها وطولها ووزنها بالإضافة إلى تأثيرها على بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة ، وهي قدرة التبادل الكاتيوني (CEC) ، ودرجة الحموضة ، والكثافة الظاهرية (APD) و المواد العضوية (OM) وكذلك التأثيرات على تركيزات الأنسجة لبعض العناصر الغذائية أو المواد الكيميائية مثل النيتروجين الكلي والفسفور والبوتاسيوم. كان الهدف الرئيسي هو تحديد ما إذا كان من الممكن إدخال biochar في ممارسات الزراعة الحالية بهدف المساهمة في تحسين جودة التربة وإنتاج المحاصيل.

تم إجراء الاختبار الأول في حقل مفتوح وفي وعاء، على تربة ذات قوام طيني طيني (الفصل 2) حيث تم استخدام جرعات مختلفة من نشارة الخشب biochar بمفرده وخطها مع روث الأبقار، والمعالجات على النحو التالي: T3: B10 ، T2:F* B5 ، T1: B5 ، T4: B10 * F ، T5: B20 ، T6: B20 * F ، T7: F و T8: شاهد.

تم إجراء الاختبار الثاني في وعاء على تربة رملية (الفصل 3) بالجرعات التالية؛ T1: 2/3 تربة + 3/1 فحم نباتي؛ T2: 2/3 تربة + 3/1 سماد؛ T3: 1/3 تربة + 3/1 سماد + 3/1 فحم نباتي؛ T4: 1/2 تربة + 2/1 سماد؛ T5: 1/2 تربة + 2/1 biochar و T6: شاهد.

أظهرت النتائج أن إضافة الفحم الحيوي بمفرده وفي الخليط كان له تأثير قلوي على التربة من خلال زيادة الرقم الهيدروجيني (وحدة واحدة) خاصة مع الجرعات العالية ، مما أدى إلى انخفاض معنوي وزيادة في المحصول مقارنة بالكمية الضابطة والسماد الطبيعي. وفقاً للأدبيات ، يُعزى هذا الانخفاض في حجم فاكهة اللفت إلى انخفاض تركيز الفوسفور في أنسجة هذه النباتات ، والذي تم ربطه بدوره بالتأثير الجيري للفحم الحيوي لدينا. أعطى استخدام الروث وحده أفضل النتائج لإنتاج اللفت ؛ يبدو أن مزيج الفحم الحيوي عند 5 أطنان / هكتار هو الأفضل والأقل ضرراً للفت مقارنة بالسيطرة وإضافة الفحم الحيوي وحده ، مما يوفر تأثيراً تآزرياً وإيجابياً مع السماد في التجربة الأولى.

بالنسبة للتجربة الثانية ، كان للفحم الحيوي (B2S) و (S3B3) وحده تأثير سلبي للغاية على معاملات إنتاج اللفت المختلفة وهي الوزن الطازج ، والطول ، وقطر البصلة (خطط التقزم ذات الوزن المنخفض) مقارنة بالسماد وحده ، الفحم الحيوي خليط السماد وعلاجات المراقبة. تم تسجيل أفضل النتائج في معاملات السماد فقط (S3F3) و (S2B2F2) والتي أظهرت أفضل أداء بسبب المحتوى الغذائي العالي للسماد الطبيعي. بالإضافة إلى ذلك ، أظهر الاختباران التأثير الإيجابي للفحم الحيوي على تحسين بعض الخواص الفيزيائية والكيميائية لهذه التربة مثل المواد العضوية وسعة التبادل الكاتيوني والكثافة الظاهرية لكلا الاختبارين. يبدو أن نتائج الدراسات المختلفة التي تم الحصول عليها حول العالم تؤكد مدى تعقيد تأثيرات biochars على أنواع المحاصيل المختلفة المستخدمة والعمليات الفيزيائية والكيميائية للتربة من خلال خصائصها (المواد الخام) وعملية إنتاجها. لأنه من المهم أن نلاحظ أنه ليس مدخل الكربون على هذا النحو هو المهم لخصوبة التربة ، ولكن تحلل المواد العضوية التي تؤثر على حياة التربة والمغذيات اللازمة للتربة الهدف الأخير.

الكلمات الأساسية. الفحم الحيوي للخشب، روث الماشية، التربة، العناصر الغذائية، (*Brassica rapa L.*)

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction | 1 |
| Chapitre I : Synthèse bibliographique | |
| 1.1. La fraction organique du sol..... | 5 |
| 1.1.1. Définition d'un sol | 5 |
| 1.1.2. La matière organique du sol | 5 |
| 1.1.3. Evolution des matières organiques dans le sol | 6 |
| 1. 1.3.1. L'humification | 6 |
| 1.1.3.2. La minéralisation | 6 |
| 1.1.4. Composition de la matière organique..... | 7 |
| 1.1.4.1. Les composés azotés..... | 7 |
| 1.1.4.2. Les composés aromatiques | 7 |
| 1.1.4.3. Les sucres..... | 8 |
| 1.1.5. Effet de la matière organique sur les propriétés du sol..... | 8 |
| 1.1.5.1. Sur les propriétés physiques du sol | 8 |
| 1.1.5.2. Sur les propriétés chimiques du sol | 9 |
| 1.1.5.3. Sur l'activité biologique du sol | 9 |
| 1.1.6. Le rapport C/N..... | 10 |
| 1.1.7. Le rôle de la matière organique dans le sol | 11 |
| 1.1.7.1. Le complexe argilo-humique | 11 |
| 1.1.7.2. La capacité d'échange cationique | 12 |
| 1.1.8. Les facteurs influençant la résidence de la matière organique dans les sols et les moyens de l'augmenter | 13 |
| 1.1.9. La fertilisation organique en Algérie..... | 14 |
| 1.1.9.1. La place du fumier en Algérie | 14 |
| 1.1.9.2. Les causes de l'appauvrissement des sols algériens en matière organique..... | 15 |
| 1.1.10. La relation entre le carbone et la plante | 17 |
| 1.1.11. Relation de la matière organique et les gaz à effet de serre | 20 |

| | |
|---|----|
| 1.1.12. La situation du carbone organique à travers le monde | 22 |
| 1.2. Le biochar | 25 |
| 1.2.1. Définition du biochar..... | 26 |
| 1.2.2. Définition de la pyrolyse | 29 |
| 1.2.3. Les fractions de la pyrolyse | 30 |
| 1.2.3.1. La fraction gazeuse | 31 |
| 1.2.3.2. La fraction liquide..... | 31 |
| 1.2.3.3. La fraction solide | 31 |
| 1.2.4. Historique et concept du Biochar..... | 32 |
| 1.2.5. Utilisation du biochar à travers le temps | 34 |
| 1.2.6. La situation du biochar en Algérie | 37 |
| 1.2.6.1. Essai du biochar au sud d'Algérie | 37 |
| 1.2.6.2. Les propriétés du Crescilis | 37 |
| 1.2.6.2.1. Les avantages de cet amendement..... | 37 |
| 1.2.6.2.2. Quelques rendements comparatifs sur quelques cultures annuelles avec et sans crescilis..... | 38 |
| 1.2.6.2.3. La production animale comme additif dans l'alimentation des animaux d'élevage confondus | 38 |
| 1.2.6.2.4. La santé animale..... | 39 |
| 1.2.6.2.5. La production fourragère..... | 39 |
| 1.2.6.2.6. L'environnement | 39 |
| 1.2.7. Les propriétés du biochar..... | 45 |
| 1.2.7.1. Propriétés physiques des biochars..... | 45 |
| 1.2.7.2. Les propriétés chimiques des biochars | 46 |
| 1.2.7.3. Les teneurs en matières volatiles, en cendres et en carbone des biochars..... | 47 |
| 1.2.7.4. La composition en éléments minéraux des biochars | 47 |
| 1.2.8. Impacts des biochars sur les propriétés de sols agricoles | 48 |
| 1.2.8.1. Effet sur les propriétés physiques des sols | 49 |
| 1.2.8.2. Effet sur les propriétés chimiques des sols | 49 |
| 1.2.8.3. Effet des biochars sur les propriétés biologiques des sols | 50 |

| | |
|---|-----------|
| 1.2.8.4. Effet des biochars sur la capacité d'échange cationique du sol..... | 52 |
| 1.2.8.5. Effet des biochars sur la rétention des nutriments | 53 |
| 1.2.9. Impacts des biochars sur le rendement et la croissance des cultures | 56 |
| 1.2.10. Les avantages environnementaux des biochars | 67 |
| 1.2.10.1. Aspects et avantages sanitaires | 67 |
| 1.2.10.2. Assainissement des sols pollués | 67 |
| 1.2.11. La production et marché du biochar..... | 71 |

1.3. Le navet

| | |
|---|-----------|
| 1.3.1. Historique du navet | 73 |
| 1.3.2. La productions du navet | 73 |
| 1.3.3. Caractéristiques du navet | 74 |
| 1.3.4. Les exigences du navet | 75 |
| 1.3.4.1. Les conditions pédo-climatiques..... | 75 |
| 1.3.4.2. Travail de sol et semis | 75 |
| 1.3.4.3. Irrigation et soins culturaux | 76 |
| 1.3.4.4. Fertilisation | 76 |
| 1.3.4.5. Principaux ennemis de la culture et méthodes de lutte | 76 |
| 1.3.4.6. Récolte et manipulation du produit..... | 76 |
| 1.3.5. Compositions et qualité nutritionnels du navet | 77 |

Chapitre II : Matériels et Méthodes

| | |
|---|-----------|
| 2.1. Essai en plein champs | 82 |
| 2.1.1. Description du site en plein champs | 82 |
| 2.1.2. Incorporation de biochar de bois et de fumier de bovin et semis du navet | 86 |
| 2.1.3. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol | 86 |
| 2.1.4. Détermination des paramètres de rendement..... | 87 |
| 2.1.5. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet | 88 |
| 2.2. Essai en pot | 88 |
| 2.2.1. Description du site en pot..... | 88 |
| 2.2.2. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol..... | 89 |

| | |
|---|------------|
| 2.2.3. Détermination des paramètres de rendement | 89 |
| 2.2.4. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet..... | 89 |
| | |
| 2.3. Essai en pots sur sol sableux..... | 90 |
| 2.3.1. Description de l'essai | 90 |
| 2.3.2. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol | 92 |
| 2.3.3. Détermination des paramètres de rendement | 92 |
| 2.3.4. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet..... | 93 |
| | |
| 3. Résultats et discussions | 96 |
| 3.1. Discussion statistique..... | 96 |
| 3.1.1. Discussion statistique de l'essai en plein champs | 96 |
| 3.1.2. Discussion statistique de l'essai en pot avec sol limoneux..... | 104 |
| 3.1.3. Discussion statistique de l'essai en pot avec le sol sableux | 113 |
| 3.2. Discussion des résultats de l'essai en plein champs et en pot | 121 |
| 3.2.1. Effet de l'apport du biochar de bois seul | 121 |
| 3.2.2. Effet de l'apport du fumier de bovin seul | 124 |
| 3.2.3. Effet de l'apport du mélange du fumier de bovin et du biochar de bois | 124 |
| 3.3. Discussion des résultats de l'essai en pot avec le sol sableux..... | 126 |
| 3.4. Discussion globale..... | 133 |
| | |
| Conclusion..... | 137 |

Annexes

Liste des abréviations

Anova : Analyse de la variance

B: biochar

BC: Black carbon

C₂H₆: Ethane

C₂H₄: Ethylène

C₃H₈: Propane

CO : monoxyde de carbone

CO₂ : dioxyde de carbone

COD : Carbone organique dissous

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

F : fumier

GES : Gaz à effet de serre

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

MEB : Microscope électronique à balayage (*Scanning electron microscopy*)

MF : Matière fraîche

MS : Matière sèche

MO : Matière organique

MOF : Matière organique fraîche

MOS : Matière organique du sol

MOV : Matières Organiques Vivantes

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure n°1 : Processus de décomposition de la matière organique dans le sol | 7 |
| Figure n°2 : Le carbone chez le végétal | 18 |
| Figure n°3 : Le cycle du carbone organique | 18 |
| Figure n°4 : Biomasses de départ comparées à leur dérivé biochar | 25 |
| Figure n°5 : Echantillons de quelques biochar de bois | 25 |
| Figure n°6 : Image MEB de biochar de sciure de bois..... | 27 |
| Figure n°7 : La structure des pores de biochar de bois..... | 27 |
| Figure n° 8 : Micrographies SEM, Structures vasculaires de sapin produit à une pyrolyse | 28 |
| Figure n°9 : La production du biochar par le procédé de la pyrolyse | 30 |
| Figure n°10 : Model d'un pyrolyseur industriel..... | 32 |
| Figure n°11 : Photos de deux terres d'Amazonie avec et sans le biochar | 34 |
| Figure n°12 : Apport de biochar dans le sable au sud d'Algérie (Timimoun)..... | 41 |
| Figure n°13 : Essai avec et sans biochar sur fève (<i>Vicia faba major</i> L.) (ensa) | 41 |
| Figure n°14 : Levée hétérogène des plants de fève avec et sans biochar | 42 |
| Figure n°15 : Développement des plants de fève avec et sans biochar..... | 42 |
| Figure n°16 : Volume des racines pour les différentes doses de biochar..... | 43 |
| Figure n°17 : Développement des plants de fève par rapport au témoin | 43 |
| Figure n°18 : Les feuilles de la Fève avec les différentes doses..... | 44 |
| Figure n°19 : Interaction plante, sol et biochar | 48 |
| Figure n°20 : Evolution du carbone, CEC et le pH en fonction de la température de pyrolyse ... | 52 |
| Figure n°21 : Les cacaoyers avec biochar..... | 65 |
| Figure n°22 : Evolution de la production des carottes et navets en fonction des années | 74 |

| | |
|--|-----|
| Figure n°23: Composition moyenne pour 100 g d'aliments cuits..... | 77 |
| Figure n°24: La sciure de bois avant et après la pyrolyse..... | 82 |
| Figure n°25: Essai en plein champs | 85 |
| Figure n°26: Le navet (<i>Brassica rapa L.</i>) variété « marteau »..... | 86 |
| Figure n°27: Cylindre métallique | 93 |
| Figure n°28: Le taux de matière organique en fonction des doses | 99 |
| Figure n°29: La CEC en fonction des doses..... | 99 |
| Figure n°30: Le pH du sol en fonction des doses | 100 |
| Figure n°31: Le taux de phosphore dans le bulbe en fonction des doses | 100 |
| Figure n°32: Le taux d'azote dans le bulbe en fonction des doses | 101 |
| Figure n°33: Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses | 101 |
| Figure n°34: Le poids du bulbe en fonction des doses | 102 |
| Figure n°35: Le diamètre du bulbe en fonction des doses | 102 |
| Figure n°36: La longueur du bulbe en fonction des doses | 103 |
| Figure n°37: Le poids des feuilles par fruit en fonction des doses | 103 |
| Figure n°38: Les navets des différents traitements..... | 106 |
| Figure n°39: Les feuilles de navet des différents traitements..... | 107 |
| Figure n°40: La CEC en fonction des doses..... | 108 |
| Figure n°41: Le taux de la matière organique en fonction des doses..... | 108 |
| Figure n°42: Le pH du sol en fonction des doses | 109 |
| Figure n°43: Le taux de phosphore dans le bulbe en fonction des doses | 109 |
| Figure n°44: Letaux d'azote dans le bulbe en fonction des doses | 110 |
| Figure n°45: Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses..... | 110 |
| Figure n°46: Le poids du bulbe en fonction des doses | 111 |

| | |
|---|-----|
| Figure n°47: Le poids des feuilles en fonction des doses | 111 |
| Figure n°48: Le diamètre du bulbe en fonction des doses | 112 |
| Figure n°49: La longueur du bulbe en fonction des doses | 112 |
| Figure n°50: La CEC en fonction des doses | 115 |
| Figure n°51: Le pH du sol en fonction des doses | 115 |
| Figure n°52: Le taux de la matière organique en fonction des doses..... | 116 |
| Figure n°53: Le taux de phosphore en fonction des doses | 116 |
| Figure n°54: Le taux d'azote dans le bulbe en fonction des doses | 117 |
| Figure n°55: Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses..... | 117 |
| Figure n°56: Le poids des feuilles en fonction des doses | 118 |
| Figure n°57: La longueur du bulbe en fonction des doses | 118 |
| Figure n°58: Le poids du bulbe en fonction des doses | 119 |
| Figure n°59: Le diamètre du bulbe en fonction des doses | 119 |
| Figure n°60: La densité apparente en fonction des doses | 120 |
| Figure n°61: Les navets des différents traitements | 131 |
| Figure n°62: Photos de quelques traitements de l'essai en pot avec le sol sableux..... | 132 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau n°1: Résumé de publications scientifiques majeures montrant les effets du biochar sur les principales cultures tropicales | 66 |
| Tableau n°2: Résumé de publications scientifiques majeures montrant les effets du biochar sur les principales cultures tempérées..... | 66 |
| Tableau n°3: La composition pour chaque nutriment pour 100 g net de navet cru | 79 |
| Tableau n°4: Les moyennes des températures et des quantités de pluies..... | 81 |
| Tableau n°5: Propriétés physico-chimiques du site expérimental avant l'essai | 83 |
| Tableau n°6: Compositions chimiques du biochar de bois et du fumier de bovin | 83 |
| Tableau n°7: Schémas du dispositif expérimental de l'essai en plein champs | 84 |
| Tableau n°8: Schémas du dispositif expérimental de l'essai en pot | 89 |
| Tableau n°9: Schémas du dispositif expérimental avec le sol sableux | 91 |
| Tableau n°10: Propriétés physico-chimiques du sol sableux | 91 |
| Tableau n°11: Compositions chimiques du biochar de bois et du fumier de bovin | 92 |

Introduction

Introduction :

La hausse de la population mondiale et la gestion des ressources nécessaires pour sa subsistance représentent des enjeux majeurs pour nos sociétés actuelles et futures. Il est estimé que la population mondiale pourrait passer de 7 à 9.25 milliards d'habitants d'ici 2050. Cette hausse de la population s'accompagnerait certes par une augmentation de la nourriture requise ainsi que par la nécessité de gérer les impacts liés à cette consommation. Il est estimé que la pression exercée par ces changements sur l'usage des terres arables se solderait par un besoin de doubler la production alimentaire actuelle. La consommation mondiale d'énergie devrait quant à elle augmenter d'environ 35 % par rapport à la consommation actuelle et ce d'ici les 20 prochaines années (FAO, 2017).

Cependant, la population doit avant toutes autres activités, assurer sa sécurité alimentaire afin de subsister, cette population mondiale est confrontée à une réalité où les besoins des individus et les ressources disponibles deviennent en concurrence et les impacts doivent être minimisés (ONU, 2011).

En effet, le nombre de menaces mondiales, telles que les changements climatiques, la rareté de l'eau, la baisse de fertilité des sols, leurs dégradations, leurs contaminations et la sécurité alimentaire est en augmentation constante ; ce qui crée une demande sans cesse croissante de nouvelles priorités d'action et des stratégies à mettre en œuvre maintenant ou au moins dans un avenir proche. Les solutions nécessaires pour s'attaquer à ces problèmes nécessitent des approches différentes ainsi que la mise en œuvre de réglementations adéquates. L'une de ces approches est l'utilisation du « **BIOCHAR** » pour l'agriculture et la gestion de l'environnement. En effet, le biochar est un bioproduit pouvant constituer une des pratiques de gestion des sols utilisées pour les cultures et une des solutions pour l'ensemble de ces enjeux, il est parmi les plus anciens produits fabriqués par l'humain utilisé et étudié depuis plus de 38 000 ans (Lehmann et al., 2006 ; Wael et al., 2019).

Cependant, la recherche sur le biochar est relativement récente et contribue au développement d'une technologie permettant de séquestrer le carbone et ainsi d'améliorer les propriétés des sols. Du point de vue de la science des sols, la faisabilité du biochar en tant qu'amendement des sols dépend de la nécessité de garantir le maintien à long terme des fonctions du sol, ce qui nécessite une compréhension approfondie des propriétés du biochar et une reconnaissance de la réaction des sols à son ajout qui diffère selon le type de sol, sources de biochar...etc. Ce n'est qu'en comprenant parfaitement les caractéristiques actuelles et futures des sols amendés aux différents biochar que nous pourrions optimiser l'utilisation de cet amendement de manière durable (Kuppusamy et al., 2015).

L'utilisation accrue des engrais chimiques dans la production agricole engendre des coûts élevés pour les producteurs et cause de graves conséquences sur l'environnement. L'intérêt d'utiliser le biochar comme amendement, un matériel riche en carbone stable produit par pyrolyse de biomasse, ne cesse d'augmenter pour améliorer les propriétés des sols agricoles. C'est seulement depuis quelques années que les chercheurs s'intéressent à ce matériel organique connu par ses propriétés physiques,

Introduction

chimique, biologiques...etc, ceci a sans cesse incité les chercheurs sur l'intérêt de son utilisation. À ce jour, très peu d'études ont été effectuées sur l'usage de biochar dans les pays sous développés, le charbon produit à partir de la biomasse fait rêver les éco-physiologistes, il serait capable à la fois de combattre et le réchauffement climatique et la baisse de fertilité des sols, deux des principales menaces de l'environnement (Lehmann et al., 2006). Plus de 634 publications de la dernière décennie sur les mélanges de biochar et de biochar-fumier ou compost comme amendements des sols ont été réalisées, dont la majorité des travaux publiés ont été réalisés dans des pays développés. Ceci dit, la réalisation de travaux sur terrain à long terme sont nécessaires afin de tester l'efficacité du biochar seul ou en mélange (biochar-composites) sur les différents types de sols et dans les différentes zones agro-climatiques pour améliorer la production des cultures (Lehmann et al., 2006). Les études sur le biochar produit dans de petits fours sont plus courantes que les biochars produits à l'échelle commerciale chez les pays développés et en fin les études en laboratoire et en serre sont plus courantes que les études sur le terrain. Le bois et les autres déchets sont les principales matières premières utilisées pour la préparation du biochar, par rapport aux autres sources et l'application de biochar-composés organiques s'est avérée plus généralement efficace pour améliorer les propriétés des sols et les rendements des cultures (que le biochar seul). De nombreuses avancées ont été apportées quant à la compréhension de l'impact de cet amendement sur la dynamique du carbone des sols. En effet, l'enfouissement des biochars dans les sols a le potentiel de devenir l'une des techniques majeures d'intensification écologique de l'agriculture du 21^{ème} siècle. L'utilité de son application dans les sols a été déduite suite à des constatations faites sur les terres noires en Amazonie : les *Terra Preta* qui ont enregistré une amélioration des propriétés physico-chimiques et biologiques (Lehmann, 2007).

La disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes devient l'un des obstacles pour l'augmentation de la production végétale. Ces éléments nutritifs du sol sont apportés comme fertilisants, une partie sera utilisée par les plantes, une autre fixée par les colloïdes du sol et le reste sera perdu soit par volatilisation ou lessivage. Lehmann et al., (2011) ont signalé que le biochar peut maintenir la teneur en éléments nutritifs dans le sol afin de limiter ces différentes formes de pertes. Dans le cadre de cette optique, Le biochar est un des produits naturels qui peut répondre à cette problématique. Il n'est pas un engrais, mais il est surtout un vecteur pour la diffusion d'éléments nutritifs et un habitat pour les microorganismes par sa forte porosité et sa surface spécifique, il augmente aussi la capacité de rétention en eau des sols.

La matière organique est le facteur clé de la fertilité des sols, en Algérie, le taux de matière organique reste faible avec une moyenne de 1.2% à cause des apports insuffisants et souvent mal exploités, des techniques culturales adoptées comme les labours, non-respect des calendriers culturaux dans certaines régions...ect. La question principale de notre recherche est comment peut-on contribuer à améliorer nos rendements en augmentant la fertilité de nos sols, afin de diminuer nos importations en engrais ou/et denrées alimentaires pour enfin pouvoir assurer une certaine sécurité alimentaire tout en préservant l'environnement.

Introduction

Dans ce contexte et afin de faire agir rapidement et efficacement sa capacité d'amendement, on a pensé l'associer avec le fumier de bovin, cet effet fertilisant « fumier-biochar » s'expliquerait d'une part par une stimulation de la vie microbienne par le fumier et par conséquent une augmentation de la disponibilité en éléments nutritifs pour les plantes, tandis que le biochar aidera à enrichir le sol en carbone (Adekiyaa et al., 2019 ; Steiner et al., 2007). Signalons que les impacts des biochars pourraient varier en fonction de leur nature, leur processus de pyrolyse et les sols sur lesquels ils seront appliqués (Ippolito et al., 2012 ; Lehmann et al., 2006 ; Spokas et Reicosky, 2009).

Le biochar a été signalé comme stimulant des racines (Lehmann et al., 2003). En effet, plusieurs auteurs ont montré non seulement une augmentation de la biomasse des racines (47%) mais aussi une augmentation du nombre de pointes des racines (64%) dans une couche d'omble provenant d'un feu de forêt avec des brindilles de mélèze. Le nombre de racines d'asperges de stockage a également augmenté avec des ajouts de biochar de noix de coco à un sol tropical (Matsubara et al., 2002). Il a également été démontré que la longueur des racines du riz augmentait avec les ajouts de biochar (Noguera et al., 2010), la germination et l'enracinement des embryons de sapin (*Abies numidica*) a aussi augmenté de manière significative, passant de 10 à 20 % sans ajouts à 32 et 80% respectivement des embryons lors de l'ajout de charbon à divers médias de croissance. Par conséquent, non seulement l'abondance, mais aussi le comportement de croissance des racines peuvent changer en réponse à la présence de biochar d'où l'idée de penser à choisir un des légumes-racine comme le navet (*Brassica rapa* L).

Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de différentes doses de biochar de bois et de fumier de bovin sur certaines propriétés physico-chimiques de notre sol et certains paramètres de croissance du navet, dans le but de déterminer s'il est envisageable de l'introduire dans les pratiques culturales actuelles dans le cadre d'une perspective de contribution à l'amélioration des rendements des cultures, afin de mettre à la disposition des agriculteurs un système de culture durable et rentable capable d'améliorer la fertilité de leurs sols et de préserver l'environnement (limiter la pollution des nappes phréatiques.....).

Chapitre 1

Synthèse Bibliographique

1.1. La fraction organique du sol:

1.1.1. Définition d'un sol :

Le sol est un écosystème vivant et naturel différencié en horizons d'épaisseur variable, qui diffèrent par leur morphologie, constitution physique, propriétés chimiques et composition des caractères biologiques. Il a la fonction de pouvoir dégrader puis recycler toutes les matières organiques mortes venant des plantes et des animaux.

1.1.2. La matière organique du sol :

La matière organique constitue une des fractions du sol, à l'origine des végétaux ou animaux, qui sont retourné au sol et passe par le processus de décomposition, elle constitue une source considérable de carbone, d'énergie et de nutriments pour les cultures et les microorganismes vivants du sol. Elle peut représenter jusqu'à 98% du carbone organique total d'un sol (Munroe et al., 2018).

Les matières organiques du sol constituent un stock de carbone où chaque année en moyenne 1 à 2% de ces matières organiques du sol se minéralisent et libèrent des éléments minéraux solubles disponibles pour les plantes et constituer ainsi une réserve à long terme dans le sol. Selon Cortufo et al., (2013), la MO dérivée de la matière végétale est constituée à 50% de carbone, il est présent sous de nombreuses formes chimiques comme des composés solubles à faibles poids moléculaires, des lipides insolubles...etc. La MO dérivée des microorganismes du sol est principalement constituée de protéines, lipides et chitines fongiques, polysaccharides et composés aromatiques (Klappenbach et al., 2000). La MO labile est principalement constitué de composés à faible poids moléculaires qui sont rapidement déstabilisés par les microorganismes.

Selon (Calvet 2003), les MO se répartissent en trois groupes :

- Les matières organiques vivantes (MOV), animale, végétale, fongique et microbienne, englobent la totalité de la biomasse en activité dont le but est la dégradation de cette matière organique représentée par la microfaune (protozoaires et nématodes), la mésofaune (collemboles, acariens...etc), la macrofaune (lombrics, fourmis...etc) et la microflore (bactéries, champignons et algues).
- Les débris d'origine végétale (résidus végétaux et exsudats), animale (déjections et cadavres), fongique et microbienne (cadavres et exsudats) appelés «Matières Organiques fraîches » elles composent les MO facilement décomposables.
- Des composés organiques stabilisés « MO stable», les matières humiques ou humus, provenant de l'évolution des matières précédentes. La partie humus représente 70 à 90 % du total. Ils comprennent les substances humiques (acides fulviques, acides humiques et humines) d'une part, et les composés inertes d'autre part (charbon).

L'humus est une matière souple et aérée, qui absorbe et retient bien l'eau, de pH variable selon que la matière organique est liée ou non à des minéraux, d'aspect foncé (brunâtre à noir), à l'odeur

caractéristique, variable selon qu'il s'agit d'une des nombreuses formes d'humus forestier, de prairie, ou de sol cultivé. Il est le résultat de l'humification, c'est-à-dire du processus qui transforme la matière organique fraîche en matière organique stabilisée, se trouvant dans la couche superficielle du sol. La formation de l'humus se fait par toute une chaîne de dégradation de la matière organique, sous l'action des champignons, des bactéries, de la microfaune et des vers de terre qui ont un rôle essentiel (Petit et Jobin, 2005).

1.1.3. Evolution des matières organiques dans le sol :

Les ions présents dans les sols proviennent essentiellement des processus de dégradation de la roche mère et de minéralisation de la matière organique. La décomposition des résidus de végétaux par les microorganismes entraîne l'évolution de la MO depuis la MO fraîche jusqu'à sa stabilisation sous une forme appelée humus riche en azote et phosphore (Cortufo et al., 2013).

La matière organique fraîche du sol est constituée de débris d'origine végétale (feuilles mortes, résidus de culture et exsudats) et animale (déjections et cadavres), cette matière organique fraîche est composée de substances hydrocarbonées (sucres solubles, amidon, cellulose, lignine, matières grasses et résines), de matières azotées (surtout sous forme de protéines) et de sels minéraux libres (calcium, magnésium, potassium, sodium...etc). Les molécules complexes de la matière organique fraîche subissent d'abord une décomposition microbienne qui libère des composés transitoires simples, le plus souvent solubles (sucres, acides aminés et cellulose). Ces composés transitoires peuvent alors suivre deux voies de transformation (Munroe et al., 2018).

1.1.3.1. L'humification:

L'humification est la formation de molécules organiques complexes et stabilisées dans le sol durant la décomposition de la matière organique du sol. En effet, des composés simples sont réorganisés et polymérisés ce qui génère de nouvelles molécules plus complexes et plus stables portant le nom de substances humiques ou d'humus. L'humus se minéralise à son tour mais beaucoup plus lentement que la matière organique fraîche : c'est la minéralisation secondaire. Tout en partant des mêmes éléments précurseurs, la qualité des humus produits dépendra des conditions physicochimiques qui règnent dans le sol.

1.1.3.2. La minéralisation:

Les composés intermédiaires peu résistants (comme les glucides, les protéines et les acides aminés, ainsi que les lipides et les acides nucléiques) sont transformés en composés minéraux solubles ou gazeux. Cette phase se déroule principalement sous l'action de la faune du sol et des microorganismes (bactéries et champignons). Si elle est totale, les produits de la transformation sont des cations, des anions et des molécules simples. Cette transformation est d'autant plus rapide que le sol est biologiquement actif.

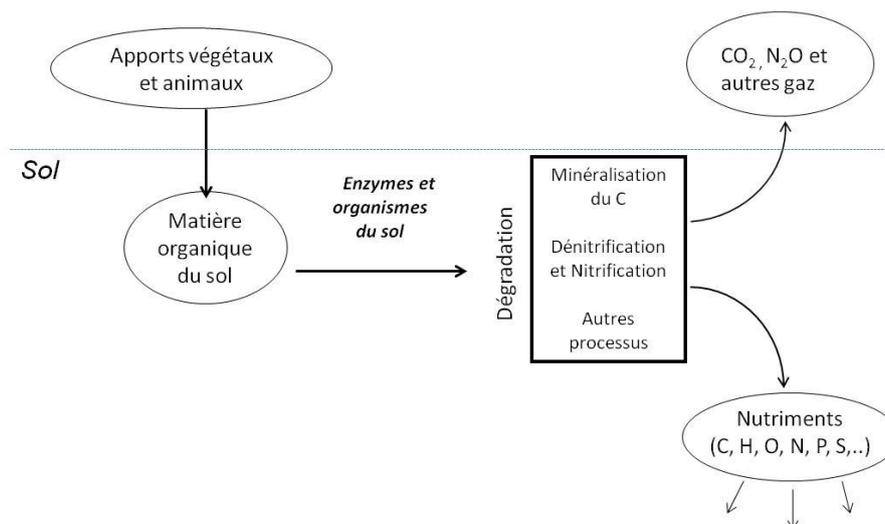


Fig n°1: Processus de décomposition de la matière organique dans le sol.

La dégradation des molécules organiques du sol par les microorganismes est accompagnée par une libération de CO₂ dans l'atmosphère et des molécules inorganiques dans le sol qui seront ensuite assimilées par la plante, fixé par le sol ou perdues par lessivage « processus de minéralisation ».

La séquestration de carbone et d'éléments nutritifs est le résultat de l'équilibre entre la minéralisation et l'immobilisation (Bushnaf, et al., 2011). Il a été montré une hausse de la température augmentait la décomposition de la (MOS) par les microorganismes et également la formation de MO dérivée de matériels microbiens (Schaeffer et al., 2015).

1.1.4. Composition de la matière organique:

1.1.4.1. Les composés azotés:

Les protéines sont les composés azotés les plus abondants dans le sol. Ils sont formés par la condensation d'acides aminés. Ceux-ci sont constitués d'une dizaine à une cinquantaine d'atomes qui ont la particularité de porter à la fois un groupement acide (-COOH) et un groupement amine (-NH₂) (Giva, 2011).

1.1.4.2. Les composés aromatiques:

Les composés aromatiques des MOS peuvent provenir des lignines compte tenu de leur rôle comme constituant important des plantes vasculaires. Les lignines sont des polymères aromatiques de poids moléculaire élevé, ce que leur confère une forte résistance à la biodégradation. Récemment, il a été montré, que les lignines ne sont pas préservés dans les sols plus que quelques années).

Des autres composés aromatiques beaucoup plus stables dans les sols que les lignines sont des charbons provenant des feux et donc de la combustion de la biomasse.

Egalement les biochars sont des composés aromatiques faisant partis des MOS. La persistance de ces composées aromatiques pyrogènes est due à leur structure intrinsèquement stable. En conséquence leur temps de résidence dans les sols peut atteindre plusieurs milliers d'années en régions tempérés (Lehmann et Kleber, 2015).

1.1.4.3. Les sucres:

Les sucres présentent de 5 à 25% de la MO des sols. Les sucres libres dans la solution du sol sont des monosaccharides. Elles forment la cellulose (constituant de la paroi des cellules végétales) et l'hémicellulose, résultent de la condensation entre elles d'un grand nombre de sucres simples. En général, les sucres peuvent être facilement dégradés par les microorganismes, qui synthétisent à leur tour des polysaccharides (parois et mucilages). Par conséquence, les sucres dans les sols sont d'origine végétale (cellulose et hémicellulose) (Giva, 2011).

1.1.5. Effet de la matière organique sur les propriétés du sol:

Les amendements organiques sont des matières qui renferment essentiellement du carbone. Ils sont le plus souvent des produits principalement composés de résidus de végétaux riche en humus, ils sont destinés à l'entretien ou la reconstitution du stock de la MO du sol et à l'amélioration de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques (Houben, et al., 2017).

1.1.5.1. Sur les propriétés physiques du sol :

Les MOS agissent sur la structuration du sol surtout dégradés et pauvres par l'agrégation des argiles et de l'humus. Elles contribuent à conférer aux agrégats et aux mottes une plus grande résistance à la dégradation sous l'effet de la pluie (résistance à la battance et à l'érosion), par cette action, les matières organiques améliorent la perméabilité de la surface du sol, l'infiltration de l'eau et le ressuyage après une pluie et l'augmentation du volume d'eau retenue par la réserve utile du sol (RU). La fraction humique est la fraction organique qui est impliquée dans la stabilité structurale d'un sol, elle intervient ainsi dans la formation et la stabilité des agrégats (Locatelli., 2013).

Selon Chalhoub (2010), elle augmente la cohésion entre les particules minérales du sol par la formation de complexe argilo-humiques et induit une hydrophobicité qui peut augmenter la résistance du sol à l'éclatement par humectation. En effet, il note une amélioration de perméabilité hydrique du sol, la capacité de rétention en eau et de la densité apparente du sol à long terme (5 ans). Locatelli (2013) ; a démontré que la rétention en eau du sol dépend à la fois de la texture du sol et de la teneur en carbone organique du sol.

La structure détermine de manière considérable le fonctionnement du sol. Elle agit, d'une part, sur la pénétration des racines dans le sol et, d'autre part, sur la circulation des éléments nutritifs (Lehmann et al., 2011).

1.1.5.2. Sur les propriétés chimiques du sol:

Les matières organiques du sol constituent un stock pour le carbone mais également pour l'azote et le soufre qui entrent dans leur constitution.

Dias et al., (2010) ont montré qu'en se décomposant la MO libère plusieurs éléments nécessaires à la croissance des plantes. C'est en effet la source de presque la totalité des éléments absorbés par les plantes dans un sol sans apport d'engrais.

Chaque année 1 à 2% de ces matières organiques du sol se minéralisent et libèrent de l'azote, du soufre et du phosphore sous forme d'éléments minéraux solubles disponibles pour les plantes. Les MOS font donc office de réserve à long terme pour ces éléments dans le sol. Elle participe avec les argiles à la formation de la capacité d'échange cationique CEC, principal réservoir pour les cations calcium, magnésium, potassium et ammonium dans le sol (Locatelli, 2013). La libération de la totalité des éléments est lente et progressive, en harmonie avec les besoins nutritionnels de la plante qui sont échelonnés dans le temps. Le rythme de libération maximum a lieu lorsque les conditions de température et d'humidité sont favorables à la fois pour l'activité des microorganismes du sol et pour la croissance des cultures (Tammeorga et al., 2014)

Les colloïdes humiques ont une capacité d'échange cationique élevée qui confère à la MO la capacité de mieux retenir les engrais, assurant ainsi une meilleure nutrition des cultures. Cette hypothèse a été vérifiée par plusieurs auteurs qui ont signalé un accroissement de la CEC d'un sol argileux après épandage de composts. Ces amendements organiques libèrent certains anions (citrate, oxalate, tartrate et lactate) qui ont plus d'affinité avec les cations Fe^{3+} , Al^{3+} , Mn^{2+} et autres métaux lourds (Ngo, 2014 ; Sahaa et al., 2019).

1.1.5.3. Sur l'activité biologique du sol :

La MOS stimule l'activité biologique, en effet, le carbone organique constitue la source d'énergie et d'éléments nutritifs pour la plupart des microorganismes du sol champignons et bactéries. Les matières organiques « fraîches » venant de la décomposition des racines mortes, des résidus de culture laissés au champ et des apports d'amendements d'engrais organiques fournissent la nourriture aux organismes vivants du sol. Chaque année, une petite part du stock de matières organiques disparaît du fait de cette activité biologique, pour cela des apports sont nécessaires pour maintenir le stock des MOS voire pour l'augmenter. Il est ainsi important d'estimer toutes les entrées de matières organiques (fumiers, composts...etc) qui sont évalués d'après leur teneur en carbone organique. Des estimations sont relatives aux quantités de racines et de résidus laissés au champ (qui sont proportionnelles au rendement).

L'impact des amendements organiques sur la microflore a été confirmé par (Fidel, et al., 2017) qui a montré que la MO en se décomposant fournit un substrat nutritif pour la multiplication de microorganismes du sol. Salducci, (2011) ont montré que le compost a un rôle proche de celui du fumier dans la stimulation de la microflore d'un sol de vignoble.

1.1.6. Le rapport C/N :

C'est un indicateur de l'activité biologique des sols Il renseigne sur la libération de nutriments par:

- Le degré d'évolution de la matière organique.
- L'activité biologique.
- Le potentiel de fourniture d'azote par le sol (minéralisation).

Les laboratoires d'analyses des sols réalisent en routine la détermination du taux de matière organique, de sa teneur en azote total et le rapport carbone organique / azote total dénommé rapport C/N.

Le taux de MO est un élément de base du suivi de la fertilité de la parcelle et un outil d'aide à la décision pour le raisonnement des apports.

L'aptitude d'un amendement organique à produire des matières organiques stables dans le sol dépend de son indice de stabilité de la matière organique (ISMO et méthode normalisée). Une valeur élevée de l'ISMO correspond généralement à une matière organique évoluée ayant un rapport C/N supérieur à 10 en moyenne.

Plus le rapport C/N est élevé (>12), plus l'activité biologique est réduite et la minéralisation rencontre des difficultés (immobilisation de l'azote) et la chute soudaine de la disponibilité des nutriments. Ainsi, les plantes souffrent de carences en nutriments et nuisent au rendement des cultures. Cela traduit des conditions d'anaérobie, d'acidité excessive...etc, parfois Il faut apporter des MO facilement dégradables pour stimuler l'activité biologique (Petit et Jobin, 2005).

C/N < 10 (de 6 à 9) très faible à faible

C/N > 10 (de 11 à 14) élevé à très élevé

C/N =10 normal

Le rapport C/N du sol est l'un des indicateurs importants qui expliquent la libération de nutriments la dynamique des amendements organiques ajoutés au sol. L'ajout des matières organiques à rapport C/N élevé dans le sol en premier lieu permet l'immobilisation à court terme de l'azote dans la biomasse microbienne et la chute soudaine de la disponibilité des nutriments. Ainsi, les plantes souffrent de carences en nutriments et nuisent au rendement des cultures. Le rapport C/N plus faible dans la matière organique démontre un taux de minéralisation plus élevé. Selon Sivapalan et al. (1985) in Locatelli, (2013), la minéralisation se produit lorsque la teneur en matière organique du sol est plus de 2 %; en dessous de ce chiffre, il y a immobilisation. Le rapport C/N varie selon la source de la matière organique par exemple pour le fumier de volaille il est de 6,5:1, les pailles des céréales 82:1 et dans la sciure de bois 664:1. La variation du taux de décomposition d'une substance pourrait être due à sa composition biochimique (taux de la lignine et cellulose). Ainsi, la qualité de la matière organique devient un facteur clé pour la minéralisation des amendements et la libération des nutriments, par conséquent, il est essentiel de reconnaître la qualité appropriée des amendements

organiques pour assurer le stock de carbone et la libération de nutriments (Hudson, 1994; Salducci, 2011).

L'ensemble de ces apports (racines, résidus, couverts végétaux et amendements) peut conduire à une augmentation du stock des MOS selon l'importance des quantités apportées et leur fréquence dans une succession de cultures.

En outre, à des taux d'acidité ($\text{pH} < 5$), l'activité microbienne est ralentie, réduisant ainsi sa décomposition, la décomposition des amendements organiques libère différents acides organiques, l'oxydation de ces acides organiques est conforme à la diminution des ions H^+ et la libération d'ions OH^- pendant la décomposition, qui pourrait jouer un rôle clé dans l'augmentation immédiate du pH du sol (Giva, 2011, Salducci, 2011).

1.1.7. Le rôle de la matière organique dans le sol:

1.1.7.1. Le complexe argilo-humique:

Le complexe argilo-humique (CAH), ou complexe adsorbant est le résultat de l'association de l'humus et des argiles. L'humus protège l'argile en retenant l'eau afin d'éviter sa dispersion. L'argile protège l'humus de l'action des microorganismes en ralentissant sa minéralisation et le tout forme un colloïde qui permet de stabiliser un sol. La formation des complexes argilo-humiques peuvent s'effectuer soit par fixation des macromolécules électronégatives de l'humus sur les sites électropositifs situés au niveau des bords externes des minéraux argileux, soit par l'intermédiaire de cations tels que Ca^{2+} , Al^{3+} ou Fe^{2+} formant des ponts entre le feuillet argileux et l'humus. Cette association constitue le complexe argilo-humique (CAH), ou complexe adsorbant du sol. Les molécules électriquement neutres de l'humus peuvent quant à elles être fixées aux minéraux argileux par des liaisons hydrogènes (Leclerc, 2001).

Le complexe argilo-humique permet au sol de résister aux agressions climatiques, le sol peut ainsi mieux absorber les excès d'eau et les particules minérales ne se dispersent pas car elles restent agglutinées à la matière organique. Il améliore aussi la capacité de stockage de l'eau ainsi que la rétention et la redistribution régulière des éléments minéraux nécessaires aux cultures en conditions favorables.

Le complexe argilo-humique est ainsi un véritable réservoir d'éléments nutritifs (le garde-manger) pour la culture qui échange en permanence des ions avec la solution du sol environnante. La profondeur et l'importance de ce phénomène varient selon le climat et le pH du sol (Salducci, 2011).

Le CAH présente une charge globale négative qui lui permet de fixer des cations, et dans une moindre mesure des anions. Les ions sont retenus sous forme échangeable et sont en équilibre avec la solution du sol. Lorsque la concentration en ions est modifiée dans la solution du sol (prélèvement par les racines des plantes, par exemple), certains ions fixés sur le CAH passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions présents auparavant dans la solution du sol (adsorption) (Sharma, 2016).

Les complexes argilo-humiques s'agglomèrent aux particules minérales plus grosses (limon et sable fin) pour former des microagrégats dont la taille se situe entre 20 et 250 μm . La réunion des microagrégats avec des particules de sable grossier, des racines et des filaments mycéliens aboutit à la formation de macroagrégats dont la taille est supérieure à 2000 μm . L'empilement des particules minérales et organiques dans les micro et macroagrégats du sol laisse des espaces vides qui constituent la porosité du sol. Les pores formés à l'intérieur et entre les agrégats conditionnent la circulation de la phase liquide et de la phase gazeuse entre les particules du sol (Leclerc, 2001).

1.1.7.2. La capacité d'échange cationique:

La capacité d'échange cationique (CEC) est la quantité totale de cations qu'un poids déterminé de sol (habituellement 100 grammes) peut adsorber sur son complexe argilo-humique et échanger avec la solution du sol dans des conditions de pH données. Autrement dit, c'est la somme des charges négatives du sol disponibles pour la fixation des ions H^+ et Al^{3+} ainsi que les cations basiques Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ (Leclec, 2001).

Autrement dit, la CEC est la quantité de cations qu'un poids de sol peut retenir, elle joue un rôle fondamental pour l'alimentation en éléments minéraux de la plante. Elle dépend essentiellement du complexe argileux-humique (CAH) du sol. Dans un sol argileux la MO vise à stabiliser les argiles, limiter le lessivage et augmenter la CEC qui sera élevé pour les sols argileux et/ou humifères et très faible chez les sols sableux d'où l'intérêt d'un apport organique (Salducci, 2011).

Les argiles sont des colloïdes qui peuvent se présenter sous forme dispersée (suspension homogène des particules) dans l'eau ou floculée (regroupement des particules en petits agrégats), les argiles présentent une charge globale négative qui leur permet de fixer et de relâcher les ions H^+ et les cations métalliques présents dans le sol. Le taux d'argile dans un sol va donc conditionner la capacité d'échange cationique et le pH du sol (Giva, 2001).

Il est maintenant bien établi qu'il existe une forte corrélation positive entre la matière organique et la CEC qui est principalement due à la charge négative des substances colloïdales (argile et l'humus), cette relation entre le sol la matière organique et la CEC varient selon la texture du sol. En effet plus la CEC d'un sol est élevée, plus la quantité de matière organique et de minéraux argileux est importante dans le sol, indiquant sa plus grande fertilité.

Une matière organique peut contribuer à une CEC 4 à 50 fois plus élevée (Sharma et Rajwar, 2016). En fonction de la réserve de résidus organiques, l'amendement augmente la CEC, d'abord dans le sol de surface et ensuite dans le sol souterrain. Une étude à long terme de 20 ans, le résultat expérimental a indiqué que l'ajout en surface de résidus organiques augmentait la CEC du sol de 136 % (de 11 à 26 meq/100 g de sol) (Mustin, 2001)

1.1.8. Les facteurs influençant la résidence de la matière organique dans les sols et les moyens de l'augmenter:

Le sol est un écosystème vivant qui a la fonction de pouvoir dégrader puis recycler toutes les matières organiques mortes venant des plantes et des animaux. La dynamique est très lente dans les horizons profonds du sol et beaucoup plus rapide sur les horizons de surface. Ainsi, toute intervention humaine peut donc avoir des impacts rapides, qu'ils soient positifs ou négatifs. En effet, certaines pratiques culturales peuvent perturber considérablement cette vie souterraine et par là, même la minéralisation de l'humus comme les labours profonds et des interventions mécaniques répétées, cette aération induit une minéralisation accélérée de l'humus. L'air entre alors massivement et stimule les micro-organismes consommateurs d'humus, de ce fait le sol s'appauvrit avec le temps (Petit et Jobin, 2005). Avec la disparition de l'humus et la perturbation de la vie du sol, la stabilité des sols diminue, ceux-ci deviennent plus sensibles aux tassements, compactations et inondations. Surtout lorsqu'ils sont laissés longtemps sans couverture végétale (Leclerc, 2001).

L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports organiques au sol et la vitesse de minéralisation. Les principales variables pédologiques, climatiques et anthropiques affectant le temps de résidence du carbone dans le sol sont :

-La température très basse limite le temps de résidence. En effet, la minéralisation augmente avec la température.

-Le labour profond aussi influence le temps de résidence de cette MOS, en détruisant périodiquement mottes et agrégats et en laissant ainsi le sol exposé à l'action désagrégeante de toutes les formes d'érosions (hydriques et éoliennes). Sans oublier l'apparition des semelles de labour qui cause la compaction et l'asphyxie en zone de labour.

-L'engorgement des sols et l'acidité permanente augmentent le temps de sa résidence.

-La présence des argiles augmentent le temps de résidence de la MO par la formation de complexe argilo-humique.

-Les carences en azote et phosphore disponibles limitent l'activité des micro-organismes.

-Le temps de résidence du carbone organique dans les sols est très variable en fonction de l'origine des sols, du climat et de l'usage des terres, par exemple chez les sols cultivés français il est d'environ 10 ans. En général, les 20 à 30 premiers centimètres contiennent plus de la moitié du carbone organique du sol.

Augmenter ou restituer le taux d'humus du sol est une opération longue et coûteuse, il faut parfois 20 ans pour ramener un sol à un seuil acceptable. Aussi, il serait erroné de vouloir ramener à tout prix ce taux à ce qu'il était précédemment. On peut penser, dans un premier temps, à équilibrer pertes et apports annuels. Par ailleurs, il serait préférable de raisonner les apports en fonction des besoins de certaines cultures (maraichage, fourrages irrigués ...).

-Il faut éviter l'utilisation de pesticides qui nuisent aux micro-organismes, aux vers de terre et d'une manière générale, à la vie du sol.

-Il est utile d'apporter régulièrement au sol des apports qui en se décomposant, se transformeront en humus ; compost, fumier bien décomposé et engrais verts (réincorporés au sol après coupe).

-Enfin, on évitera de travailler le sol trop en profondeur, pour ne pas perturber son équilibre (l'essentiel de la microfaune et l'humus se trouvent dans les couches supérieures : retourner le sol, c'est le désorganiser). En effet, le taux d'humus est également lié à la profondeur de travail du sol et à son aération. Il serait intéressant d'étudier l'influence des outils à dents sur l'évolution du stock d'humus du sol, ces outils ont la particularité de travailler le sol sans le retourner ce qui diminue l'aération du sol (techniques superficielles). Un essai comparant l'effet de 2 profondeurs de travail du sol (35 cm et 10 cm) sur l'évolution du stock de matière organique a montré les résultats suivants :

-Un stock initial de matière organique : 81 tonnes/ha, 10 ans après restitutions des pailles : 72 T (labour à 35 cm) et 76 T (labour à 10 cm) Essai réalisé en Haute-Garonne sur rotation blé-maïs irrigué. Le travail superficiel du sol permet donc une économie de matière organique ; des expériences du même genre ont été réalisées au Khroub par l'IDGC. Les résultats pourtant satisfaisant n'ont jamais fait l'objet de vulgarisation au niveau du terrain.

Les sources de matière organiques sont multiples : fumier, déchets de récoltes (paille, feuilles, tiges et racines), engrais verts, prairies, composts urbains ou composts de déchets verts et boues résiduelles de stations d'épuration des eaux usées. Ces apports de matière organique sont caractérisés par leur vitesse de minéralisation. Ainsi, les engrais verts ont une action intense sur la stabilité structurale du sol, mais celle-ci est de courte durée (quelques mois au maximum). Les pailles de céréales ont une action moins marquée mais plus durable (quelques années). Elles laissent dans le sol un peu d'humus. Le fumier, quant à lui, a un effet prolongé bien que moins intense que les engrais verts et les pailles (Samsonet al., 2009, Salducci, 2011).

1.1.9. La fertilisation organique en Algérie:

A coté de plusieurs types de fumures organiques telle que le compost, vermicompost ou encore le lombricompost, fiente de volailles, les résidus végétaux et les algues marines connus pour leurs effets bénéfiques sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (Madi, 2012).

1.1.9.1. La place du fumier en Algérie :

Le fumier est très recherché en Algérie compte tenu du besoin important mais aussi des techniques d'élevage, qui ne permettent pas souvent une production importante de fumier.

Dans toutes les régions montagneuses de l'Algérie, particulièrement le nord-est du pays, une grande partie du cheptel bovin est quasi en permanence dans les maquis et au niveau des forêts, où l'accumulation et/ou la récupération du fumier est pratiquement très faible (Khaldoun et ., 2001).

Par ailleurs, une grande partie du cheptel, surtout ovin et caprin, passe la nuit dans des enclos temporaires (zriba), où la récupération du fumier est très rare, voir parfois impossible. Enfin, il ne faut pas oublier qu'une grande partie du cheptel ovin, caprin et surtout camelin est soumise à des transhumances annuelles, ce qui rend aléatoire voire impossible la récupération du fumier. Le fumier

est aussi utilisé au niveau des parcelles irriguées réservées aux cultures maraîchères et à quelques espèces d'arbres. Le fumier est très bien valorisé dans les oasis, dont le système de cultures est basé sur les cultures en étage; le palmier dattier, l'arboriculture fruitière et enfin les cultures maraîchères, fourragères et céréalières (Madi, 2012).

Le fumier de ferme est l'amendement le plus communément employé dans la fertilisation des terres. Cet engrais mixte, formé de substances animales (déjections) et de litière paille. La composition du fumier varie beaucoup avec la nature des animaux qui le produisent, leur mode d'alimentation....etc connu pour sa richesse en azote, phosphore et potassium.

La texture des fumiers animaux varie en fonction de la teneur en eau des déjections animales et des quantités de litières utilisées. Ils peuvent également contenir des refus d'alimentation, de la terre ou de l'eau. Aussi la texture des déjections animales varie en fonction de l'espèce d'animal, le stade de croissance, son alimentation...etc. Les bovins destinés à l'engraissement produisent des déjections semi- solides (Huber et Schaub, 2011).

1.1.9.2. Les causes de l'appauvrissement des sols algériens en matière :

Cette situation a plusieurs causes, en effet, durant la colonisation, les colons ont étendu la culture des céréales à des zones à pluviométrie faible et irrégulière. Cela a été possible grâce à la pratique de la jachère travaillée. Comme dans tout système extensif, il s'agissait de gagner le maximum en investissant le minimum. De ce fait, le sol était travaillé intensément afin d'accroître la minéralisation de l'humus et la libération de l'azote minéral. Ainsi, les rendements augmentaient sans apports d'engrais. Le sol riche d'un stock d'humus qui avait mis des siècles à s'accumuler a permis à cette pratique de durer assez longtemps. Pour conserver les rendements à un niveau raisonnable (environ 12 qx/ha), les terres étaient plus profondément travaillées et le nombre de passages d'outils aratoires était augmenté. Cela dans le but de respectivement ramener à la surface les horizons du sol riches en humus et accroître la minéralisation de ce dernier, cette pratique a ramené le taux d'humus des sols algériens de 2% à 0,2% (FAO, 2005).

Cependant, il faut distinguer les terres des colons de celles des privés algériens alors en majorité non équipées de moyens de traction modernes. En effet, la pratique de la jachère travaillée n'a été possible que grâce à un fort taux de mécanisation et de motorisation. Par conséquent, les terres du secteur privé qui n'ont jamais possédé de tels moyens de traction sont à distinguer du reste des terres. C'est ainsi, qu'après des pluies, on peut voir côte à côte des terres de petits paysans avec un bon état structural (peu de traces de battance) et des terres de domaines autogérés battues et érodées (Madi, 2012).

Actuellement, la jachère est progressivement résorbée, cela est salubre. Signalons qu'avant l'amorce de cette nouvelle tendance, les nombreux passages d'outils en année de jachère avait été progressivement réduits pour laisser place à un simple labour de printemps suivi d'un ou deux passages de cover-crop.

Les producteurs n'ont pas encore pris conscience du caractère néfaste de la jachère et du faible taux d'humus qui a résulté de cette pratique. C'est à dire tout l'effort de vulgarisation qui reste à fournir, d'autant plus que d'autres tendances se développent. C'est le cas du pâturage des chaumes par des « hordes » de moutons qui provoque une diminution de la matière organique (chaumes) que l'on pourrait restituer au sol.

Une cause de la faiblesse de nos sols en humus vient du fait que l'agriculture coloniale n'a jamais eu pour priorité le développement de l'élevage bovin (source de fumier), cela étant principalement dû à l'absence de débouchés vers la métropole.

Enfin, une autre cause provient d'une association céréaliculture-élevage non équilibrée. Afin d'assurer un maximum de revenus, les producteurs des hautes plaines céréalières associent en général l'élevage ovin à la céréaliculture. Les moutons pâturent la partie de l'exploitation laissée en jachère. Après la récolte des céréales, ils pâturent les chaumes. Les troupeaux de la steppe remontant vers le Nord profitent également de ces chaumes. Les nomades sont même parfois embauchés comme ouvriers saisonniers (récolte manuelle de la lentille) (Madi, 2012).

Si les chaumes constituent un aliment de choix pour le cheptel ovin, leur enfouissement dans le sol pourrait constituer une source de matière organique non négligeable. Or, une telle pratique n'est guère répandue, car ces chaumes représentent une source de revenus à court terme pour les agriculteurs locaux. L'attrait des chaumes pour les nomades est aussi à noter. Il est tel que parfois ceux-ci s'imposent de force, considérant l'existence d'un droit de passage ancestral vers le Tell. Les ouvriers chargés de la récolte ayant à peine le temps de ramasser les sacs de grains et les bottes de paille. Il est donc difficile de faire admettre aux céréaliculteurs qu'une telle source de revenu (location des chaumes) puisse être enfouie sous dix centimètres de terre. Notons que les déjections des moutons lors du pâturage des chaumes sont surtout riches en azote et ne peuvent constituer un apport important et de qualité en ce qui concerne l'amélioration de la stabilité structurale, tel que le permet un enfouissement des chaumes de céréales (FAO, 2005).

1.1.10. La relation entre le carbone et la plante :

Les éléments nutritifs assimilables par les végétaux sont retenus à l'intérieur de la MO et adsorbés sur ses surfaces (Munroe et al., 2018). La MO est un réservoir d'éléments nutritifs, qui grâce à la minéralisation peuvent être libérés et rendus disponibles pour l'absorption par les plantes ou d'autres organismes du sol.

Les tissus végétaux sont essentiellement constitués de carbone, hydrogène et oxygène. Les éléments nutritifs sont divisés en éléments nutritifs primaires, secondaires et oligo-éléments. Les végétaux ont besoin d'éléments nutritifs en quantités suffisantes pour arriver à une croissance optimale, toute carence en l'un ou l'autre des éléments nutritifs entraînera une baisse de rendement en quantité et en qualité. 90 à 96% de la matière sèche des plantes provient uniquement des atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène fournis par les gaz O_2 et CO_2 et par l'eau. L'azote, le phosphore, le potassium, le calcium et les autres éléments minéraux incluant les oligo-éléments constituent le reste de la matière sèche. Chez les végétaux, cette composition en éléments minéraux varie en fonction de l'espèce, de l'âge et de la nature des organes et de la composition du sol (Soltner, 2003).

Le carbone subit en permanence des transferts entre les différents milieux. Les plantes absorbent le CO_2 atmosphérique par la photosynthèse et le transforment en composés carbonés organiques (sucres, cellulose...etc). À l'inverse, elles rejettent une petite quantité de CO_2 dans l'atmosphère lors de la respiration et à la mort des tissus, les microorganismes du sol décomposent la matière organique végétale et libèrent une partie du carbone de la plante dans l'atmosphère, sous forme de CO_2 . L'autre partie du carbone est stockée dans le sol, une très large proportion du CO_2 est ainsi dissoute dans les océans. En effet, la séquestration du COS est un mécanisme par lequel le carbone atmosphérique est fixé et stocké dans le sol grâce aux plantes ou aux résidus organiques. A partir du CO_2 , la séquestration du COS comporte trois étapes:

1) prélèvement de CO_2 dans l'atmosphère via la photosynthèse des végétaux, 2) transfert de carbone du CO_2 en biomasse végétale et 3) transfert du carbone de la biomasse végétale vers le sol dans lequel il est stocké sous forme de COS dans le réservoir le plus instable. Ce réservoir est caractérisé par le plus fort taux de renouvellement (de quelques jours à quelques années) qui est composé de résidus de plantes récemment incorporés et est rapidement décomposable par la faune du sol, ce qui génère souvent des émissions de CO_2 en retour dans l'atmosphère (FAO, 2017).

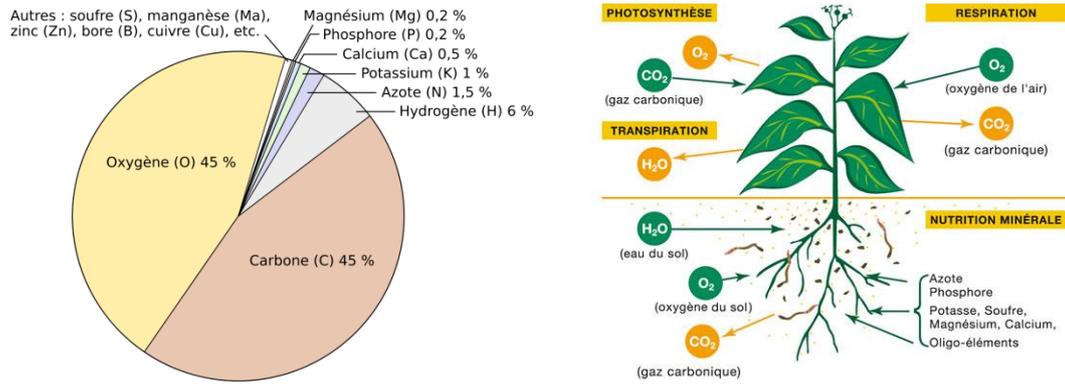


Fig n° 2: Le carbone chez le végétal

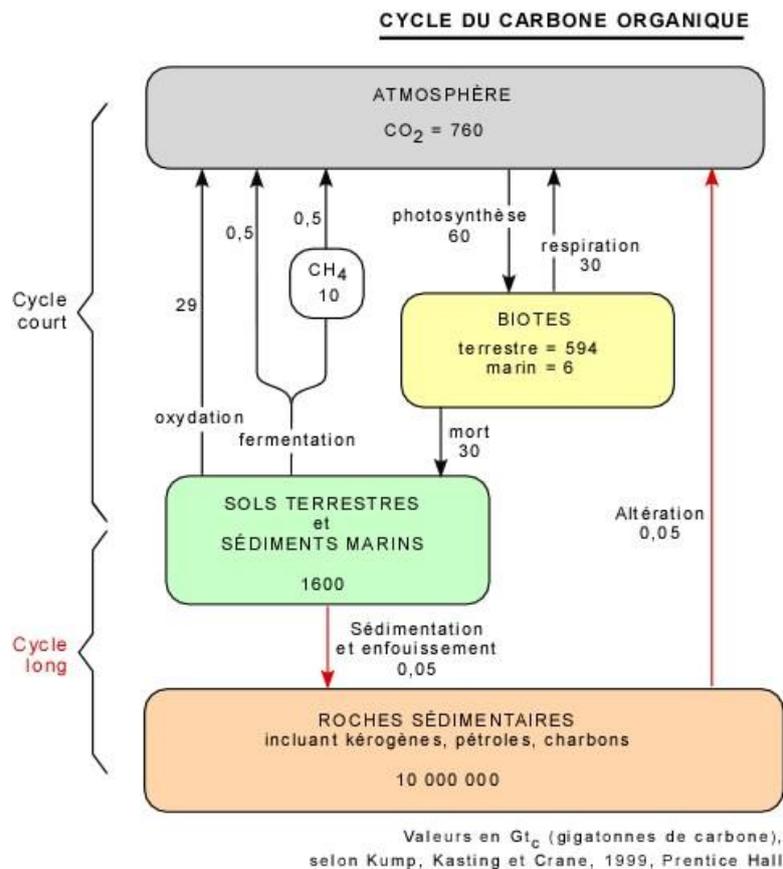


Fig n° 3 : Le cycle du carbone organique.

Le cycle du carbone est très important pour la biosphère, puisque la vie est fondée sur l'utilisation de composés à base de carbone, la disponibilité en carbone fait partie des facteurs primordiaux pour le développement des êtres vivants sur Terre. Le processus de base du recyclage du carbone à court terme est le couple photosynthèse-respiration, c'est-à-dire la conversion du C_{inorg} du CO_2 en C_{org} par la photosynthèse, et subséquemment l'inverse, la conversion du C_{org} de la matière organique en C_{inorg} par la respiration. Il faut considérer trois réactions de base (Soltner, 2003). Ceci peut être résumé en :

-Chez les végétaux la photosynthèse consiste à réduire le dioxyde de carbone à partir de l'atmosphère en présence d'eau et des sels minéraux absorbée par les racines à l'aide de l'énergie solaire captée par les feuilles avec libération d'oxygène, afin de produire des glucides (hydrates de carbone (CH_2O) nécessaires à leur développement.



-La respiration est l'inverse de la photosynthèse, elle transforme les hydrates de carbone en CO_2 , en présence de l'oxygène libre O_2 . L'équation de la respiration peut se résumer à :



Les plantes produisent de la matière organique azotée (acides aminés et autres molécules organiques azotées) à partir des sucres fabriqués par photosynthèse et d'ions NO_3^- puisés dans le sol. Les décomposeurs du sol (bactéries, mycètes) transforment la matière organique azotée provenant des plantes ou des animaux morts en CO_2 , H_2O et ammoniac (NH_3). Au contact de l'eau, l'ammoniac se transforme en ions NH_4^+ qui seront assimilés par les racines suite à la décomposition de la matière organique (Sani et al., 2020).

Un sol agricole, par exemple, où la majeure partie de la végétation est récoltée et exportée, finit par s'appauvrir en azote (et autres éléments puisés par la plante). Il en est de même pour une forêt que l'on déboise quoique, dans ce cas, il faut dire que le bois proprement dit qu'on prélève n'est pas tellement riche en N, P ou K. Le bois, c'est surtout de la cellulose (C, O et H). Une bonne partie de l'azote d'un champ de blé, par exemple, va se retrouver dans les cours d'eau où sont déversées les eaux d'égouts des grandes villes et non dans le champ d'où vient ce blé.

1.1.11. Relation de la matière organique et les gaz à effet de serre :

Le CO₂, gaz incolore, inerte et non toxique, est le principal gaz à effet de serre à l'état naturel. Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans, Il est produit lorsque des composés carbonés sont brûlés et en présence d'oxygène. Ses sources naturelles sont très nombreuses : éruptions volcaniques, respiration des plantes, des animaux et des hommes, incendies naturels de forêts, décomposition de la matière organique morte de plantes et d'animaux (Kammann et al., 2011).

Sous l'action de l'homme, le taux de CO₂ dans l'atmosphère augmente régulièrement de 30% au cours de ces deux derniers siècles lorsque des écosystèmes naturels sont labourés et mis en culture, la plus grande partie du carbone piégé dans ces sols sont libérés dans l'atmosphère sous la forme de CO₂ (60%) ou de méthane, deux gaz à effet de serre, ou dans l'eau sous forme d'acide carbonique. La matière organique peut jouer un rôle de puits ou d'émetteur de carbone CO₂ elle influence également sur la qualité de l'air par l'émission de gaz à effet de serre principalement le CO₂, ce dernier est un des produits résultant de la dégradation de la matière organique et un des plus important gaz à effet de serre, il contribue à 60% du réchauffement climatique (Agegnehua, 2015).

Les microorganismes du sol décomposent la matière organique végétale et libèrent une partie du carbone de la plante dans l'atmosphère, sous forme de CO₂ l'autre partie du carbone est stockée dans le sol. La minéralisation de la matière organique passe par différentes phases dont chacune est sous le contrôle des organismes sous l'influence les conditions ambiantes du sol. Rejeté vers l'atmosphère et représente le second plus grand flux de carbone terrestre. Cependant, la dernière étape de cette décomposition est assurée par les microorganismes hétérotrophes aérobies (Waldrop, 2000), cette dernière étape est donc marquée par la libération de CO₂ (Giva, 2011).

En effet, le sol est le plus grand réservoir de carbone (C) et participe au cycle global de ce dernier. Il émet à la fois du gaz carbonique (CO₂), via la respiration des racines et des microorganismes hétérotrophes et piège du CO₂ atmosphérique, via la photosynthèse et l'incorporation au sol des produits de décomposition des litières, sous forme d'un stock de matières organiques composé à 50% de carbone. La compréhension de la dynamique du carbone organique des sols est un enjeu majeur à la fois pour la fertilité des sols et pour l'atténuation du changement climatique, à travers le stockage plus ou moins long de carbone dans les sols. La plupart du carbone piégé dans le sol est perdu dans l'atmosphère quand les écosystèmes naturels sont surtout labourés et mis en culture. En effet, le processus microbien est accompagnés par la libération d'éléments nutritifs, ces éléments nutritifs sont intégré à la biomasse microbienne et végétale, stocké dans le sol ou peuvent être perdus à travers le lessivage (Agegnehu, 2016).

L'évolution du stock de carbone organique dans les sols résulte de l'équilibre entre les apports de matières organiques végétales au sol et leur minéralisation. Le sol représente le plus grand réservoir de carbone de la biosphère continentale contenant environ deux fois le stock de carbone atmosphérique et trois fois le stock de carbone contenu dans la végétation (40 tonnes par hectare (t/ha) en sols cultivés et 65 t/ha sous prairies) (Liu et al., 2020).

En croissant les plantes absorbent du CO₂, produisant ainsi de la biomasse qui contient du carbone. Plutôt que de laisser les végétaux inutilisés se décomposer en émettant du CO₂, la pyrolyse transforme environ la moitié du carbone dans une forme stable et inactive. La photosynthèse absorbe le CO₂ de l'atmosphère, le biochar stocke le carbone sous une forme solide et bénéfique (Li, et al., 2020). Le biochar réduit aussi les émissions d'autres gaz à effet de serre, incluant le méthane et l'oxyde nitreux. Une étude récente estime que 12% des émissions de gaz à effet de serre émis par l'activité humaine pourraient être compensés par l'usage du biochar. La longévité du biochar dans le sol peut atteindre plusieurs milliers d'années, ce qui permet de les considérer comme de véritables puits de carbone (Wang et al., 2012).

Un certain nombre de chercheurs se sont intéressés au biochar car il est présenté comme une possibilité de fixer du carbone atmosphérique avec un stockage à long terme au niveau du sol. Les propriétés physiques du sol (texture et structure), les facteurs climatiques (précipitations et température), les pratiques de gestion des sols et des cultures permettent de gérer le taux de carbone organique du sol. La séquestration du carbone peut être augmentée par l'adoption de stratégies de conservation des ressources et de meilleures pratiques de gestion telles que le semis direct, utilisations des outils à dents, engrais verts, fertilisation étudiée, l'épandage de fumier, de boues, de compost ...etc, afin d'augmenter les rendements qui sont en baisse continue. **Le biochar**, une arme à double tranchant, un amendement organique capable de fixer du dioxyde de carbone qui se trouve dans l'atmosphère et dont la durée de vie peut s'étaler sur plusieurs années. Ce gaz, en partie responsable du réchauffement climatique, qui pourrait être emprisonné dans le sol comme source de carbone (Agegnehua, 2015).

En plus de la réduction du taux de CO₂, les émissions d'autres gaz à effet de serre provenant du sol peuvent également être réduites. Rondon et al., (2005) ont constaté une réduction des émissions d'oxyde nitreux de 50 % sur des parcelles de soja et suppression presque complète des émissions de méthane du sol en ajoutant du biochar à un taux de 20 T /ha à la savane des sols acides dans l'est de l'Europe (Wang et al., 2012).

L'agriculture et la sylviculture contribueraient pour 12% des émissions de dioxyde de carbone. Selon Li et al., (2021), pour une tonne de « biochar », c'est 3 tonnes de CO₂ éliminé, ce qui explique son intérêt aussi dans le contexte des préoccupations concernant le réchauffement climatique. Des études ont démontré que une tonne de biochar dérivée de la bagasse sécherait environ 2,3 tonnes de CO₂ équivalents. Il a également le potentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des sols, notamment l'oxyde nitreux et le méthane. Ces faibles émissions peuvent être expliquées par éventuellement une plus grande stabilisation du C. L'évolution faible de l'oxyde nitreux peut également être due à un effet du ralentissement du cycle de l'azote (Salducci, 2011).

Une réduction significative des émissions d'oxyde nitreux provenant des sols a été démontrée suite à l'application de divers produits à base de biochar en Australie. En effet, le biochar dérivé de déchets de canne à sucre et de bagasse ont été appliqués à un taux de 10t/ha sur les sols de la région du Burdekin en Australie pour tester les réductions d'émissions de gaz à effet de serre. Ils ont constaté

une baisse significative des émissions de gaz à effet de serre comme l'oxyde nitreux (N_2O), provenant de sols fertilisés à l'urée. Selon Wang et al., (2012), la majorité des nutriments contenus dans les matières premières de la canne à sucre sont retenus dans le biochar; il peut donc être retourné sur le terrain avec le carbone. L'évaluation de cette technologie à l'échelle du terrain est justifiée par l'importance des résultats économiques, environnementaux et climatiques atteints (Wang et al., 2012 ; Agegnehu et al., 2016).

Deux sols de paddy (développés à partir de sol rouge granitique (S1) et d'argile rouge quaternaire (S2) de textures différentes en condition d'inondation) Les sols ont été soumis aux trois traitements au biochar (dérivé de la paille de blé) suivants 0 %, 1 % et 2 % du poids du sol. L'incubation a duré 180 jours. Le biochar peut se combiner avec les particules du sol et fournir un habitat approprié aux microbes du sol en S1, ce qui a augmenté la décomposition du C organique. L'ajout de biochar a considérablement réduit les émissions du méthane (Liu et al., 2020 ; Woolf, 2008).

L'application de différents amendements organiques, dont le biochar, peut jouer un rôle essentiel pour reconstituer et conserver le carbone dans les sols et assurer la durabilité de l'agriculture pendant une longue période tout en contribuant de manière significative à développer la structure du sol. En outre, la minéralisation du biochar est beaucoup plus lente que celle de tout autre des matières organiques. Les résultats des recherches ont montré un taux de minéralisation du carbone de 1,5% dans les sols amendés au biochar, alors que dans les sols non amendés, il était de 2,4% (Sohi et al., 2012).

1.1.12. La situation du carbone organique à travers le monde :

La distribution du COS est très hétérogène et très fortement dépendante du type de sol, de l'utilisation de la terre et des conditions climatiques. Pour certains types de sols et pour certaines utilisations du territoire, le stockage de COS est très important. Le changement climatique, la dégradation des terres et la perte de biodiversité...etc sont devenus l'une des préoccupations les plus importantes actuellement dans le monde (Woolf, 2008). Une fois intégré au sol sous forme de matériel organique provenant de la faune et de la flore du sol, le carbone persiste dans le sol pendant des dizaines, des centaines voire même des milliers d'années. Ce COS peut être perdu sous la forme de dioxyde de carbone (CO_2) ou de méthane (CH_4) émis dans l'atmosphère, ou sous la forme de carbone organique dissous (COD), lessivé vers les rivières ou les océans (Lentz et al., 2014).

Les dynamiques de ces processus soulignent l'importance de quantifier les flux globaux de carbone pour assurer les avantages maximum que peuvent produire le COS pour la production alimentaire. En tant qu'indicateur de la fertilité du sol, le COS est important pour ses contributions à la production alimentaire, la réduction et l'adaptation au changement climatique et la réalisation des objectifs pour le développement durable (Parish et al., 2008).

Lorsque la matière organique du sol (MOS) est décomposée (ou minéralisée) par les microorganismes, du CO_2 est émis en retour dans l'atmosphère. Les exsudats racinaires tels que l'acide oxalique, qui libère des composés organiques à partir d'associations minérales protectrices peuvent aussi entraîner des pertes de carbone (Lentz et al., 2014). Finalement, une partie du carbone

du sol est aussi exportée vers les rivières et océans sous la forme de carbone organique dissous (COD) ou dans le matériel d'érosion. La température du sol et son contenu en eau sont deux facteurs (principalement déterminés par les conditions climatiques) contrôlant la décomposition de la MOS. En effet, par exemple les faibles températures et l'engorgement en eau dans certains sols réduisent les taux de décomposition. Le cas aussi des Tourbières, où le stock de COS est susceptible de comprendre jusqu'à 85 pour cent du stock de carbone terrestre dans les forêts boréales, 60 pour cent dans les forêts tempérées et 50 pour cent dans les forêts tropicales. Une grande partie du stock total de COS se trouve dans les sols de toundra, pré-toundra et régions de taïga. La majorité du carbone du sol se concentre dans les tourbières des forêts boréales et tropicales dans l'Asie du Sud-est. Les tourbières sont des écosystèmes humides caractérisés par l'accumulation de matière organique (tourbe) dérivée de matériel végétal mort et en décomposition sous des conditions de saturation en eau permanente (Parish et al., 2008).

La carte mondiale des stocks du carbone organique du sol présents dans les 30 premiers centimètres, montre des régions naturelles contenant des stocks de carbone susceptibles d'être conservés et pourrait de ce fait être davantage exploité. Dernièrement, plus de 90 pays membres ont partagé leurs cartes nationales indiquant leurs stocks de carbone. Permettant de stocker du carbone, la conservation et la restauration des sols est importante pour parvenir à une agriculture durable et atténuer le changement climatique. Les sols mondiaux qui constituent le plus grand puits de carbone au monde permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Selon cette carte, le sol contient près de 680 milliards de tonnes de carbone dans ses premiers 30 centimètres, soit le double de ce qui est présent dans notre atmosphère. Il s'agit d'une quantité importante par rapport au carbone stocké dans l'ensemble de la végétation qui équivaut à 560 milliards de tonnes (Agegnehua et al., 2016).

On trouve plus de 60% de ces 680 milliards de tonnes de carbone dans dix pays à travers le monde, qui sont la Russie, le Canada, les Etats-Unis, la Chine, le Brésil, l'Indonésie, l'Australie, l'Argentine, le Kazakhstan et la République démocratique du Congo. Des mesures devront être prises en vue de protéger ces sols naturellement riches en carbone et soutenue le Groupe technique intergouvernemental de la FAO sur les sols (Wang et al., 2012). Les auteurs ont conclu que les sols du monde entier ont encore augmenté leurs émissions de CO₂ ces dernières décennies, probablement à cause de l'augmentation de l'activité microbienne induite par l'accroissement de température, résultant en une biodégradation de l'humus. Ce CO₂ serait, en termes de bilan, moins nuisible pour le climat comparé au méthane, considéré comme un gaz à effet de serre plus puissant (Agegnehua et al., 2015).

Le sol a une immense capacité à servir de puits éventuel de CO₂ atmosphérique. La concentration de CO₂ et d'autres GES dans l'atmosphère est suffisamment élevée pour que le globe se réchauffe et que le climat change. Au cours du dernier siècle, la température moyenne à la surface de la planète a augmenté de 1,1 C°, soit causée par l'augmentation des émissions de CO₂, CH₄, N₂O et NO dans l'atmosphère. Suite au réchauffement climatique et la baisse de fertilité des sols et afin de parvenir à trouver un compromis entre ces différents problèmes, beaucoup insistent sur l'intérêt du biochar

comme une des solutions dans le sens où il permet la fixation du carbone dans les sols. Les défenseurs du biochar prétendent qu'il a le potentiel pour absorber entre 5,5 et 9,5 gigatonnes de carbone chaque année (Kammann et al., 2011 ; Lentz et Spokas, 2014).

La température élevée du sol et de l'air associée à une forte teneur en humidité, favorise la prolifération des microorganismes et la décomposition de différents engrais organiques comme le compost, le fumier, les résidus de culture...etc ajoutés aux sols d'où la diminution rapide de la teneur en matière organique avec une baisse de la fertilité des sols d'une part et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre d'une autre part. Par conséquent, la teneur actuelle en carbone dans les sols de nombreux pays des régions climatiques tropicales et subtropicales déclinent à un rythme alarmant. Par ailleurs, la recherche pour une conservation des ressources existantes, les stratégies et les meilleures pratiques de gestion reste essentiellement nécessaires pour séquestrer le carbone dans les sols. La perturbation accentuée des sols à travers les différentes méthodes utilisées, continuent à être pratiquer aboutissant ainsi à une accélération de la décomposition accrue de la matière organique malgré qu'une grande quantité de carbone est ajoutée au sol chaque année (Spokas et Reicosky, 2009). Les stratégies de conservation des ressources et l'approvisionnement continu en matières organiques contribuent pour augmenter et maintenir la teneur en carbone ainsi que la fertilité des sols lorsque le biochar est apparu comme un amendement prometteur pour le stockage du carbone dans le sol et l'atténuation le réchauffement climatique (Wang et al., 2012).

1.2. Le biochar:



Fig n°4 : Biomasses de départ (sur la partie supérieure) comparées à leur dérivé biochar (sur la partie inférieure). Résidus de conifères (à gauche) et fumier de poulet (sur le droit) (Cimò, 2013)

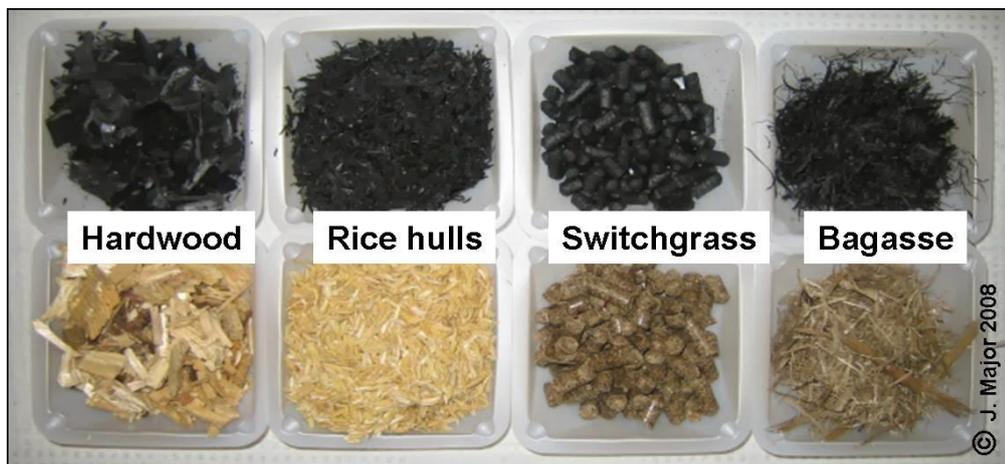
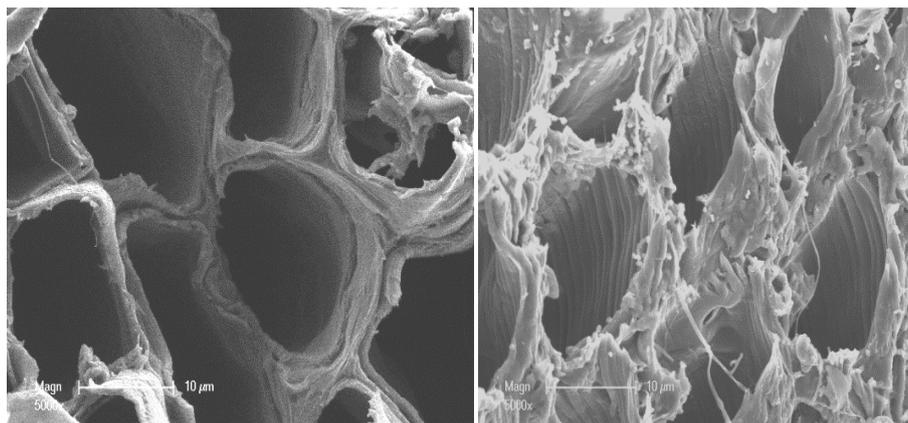


Fig n°5: Echantillons de quelques biochar de bois, coque de riz, Millet et tige de canne à sucre (Major et al., 2012)

1.2.1. Définition du biochar:

Le terme 'biochar' est l'abréviation de « bio-charcoal»; du préfixe « bio » qui veut dire origine biologique et du mot anglais « charcoal » qui signifie charbon de bois. Il est parfois nommé Agrichar quand il est destiné à enrichir les sols agricoles. Les biochars proviennent de la pyrolyse de la biomasse faiblement valorisable d'origine végétale ou animale. Ce substrat a le potentiel d'améliorer la qualité des sols et la croissance des plantes tout en diminuant les apports d'engrais et en séquestrant le carbone (Lehmann, 2007). La composition des biochars varie et dépend fortement de la nature de la biomasse utilisée et du processus de pyrolyse utilisé (Steiner, 2010). En effet, le charbon obtenu par pyrolyse de biomasse des matières organiques d'origine diverse paille, fumier, balle de riz, carcasses d'animaux, écorces, boue de papeterie... etc., généralement des déchets de scierie ou des résidus agricoles sont écrasés en petites particules produit par des procédés artisanaux ou industriels mais la technique traditionnelle appelée « pyrolyse lente » est la plus populaire à travers le monde. Cette technique se traduit par la conversion de la biomasse végétale à une température de pyrolyse modérée (environ 500°C) et un temps de résidence long (plus d'une journée) (Gulaqa et al., 2020).

Le biochar est un matériau poreux de faible densité (< 0.5 g/cm³), il est principalement composé de graphite amorphe. Son incorporation dans le sol augmente la porosité et l'aération du sol, rendant ainsi le sol propice au développement racinaire des plantes. Selon Lehman et Kleber, (2015), il s'agit de petits fragments noirs riches en carbone amorphe (inerte) de structures alvéolaires légères et poreuses très développées c'est ce qui lui fournit sa capacité à absorber l'eau comme une éponge qui aspire l'eau, les éléments nutritifs et peut aussi constituer un foyer pour les micro-organismes (Li et al., 2020). Ce n'est pas un engrais, il ne fournit pas d'éléments nutritifs, c'est pour cela qu'il complète très bien l'action du fumier ou autres sources organiques ou minérales; car il va fixer ces nutriments et ainsi les rendre plus durablement accessibles pour les plantes. Il sert à amender les sols et est présenté comme un excellent capteur de carbone (Lehmann et al., 2011).



Char-Brut (600°C)

Char-Brut (800°C)

Fig n°6 : Image MEB de biochars issus de la pyrolyse de la sciure de bois de cyprès brute à différentes températures (600 °C et 800°C) (agrandissement : 5000 fois) (Haddad, 2018).

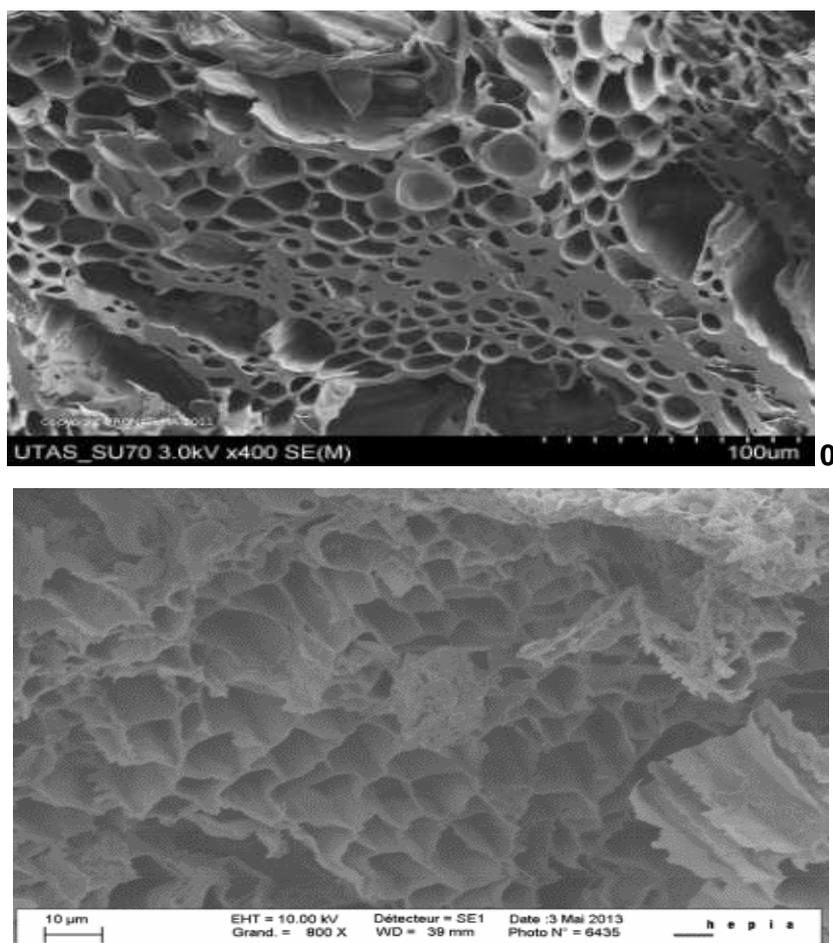


Fig n°7 : La structure des pores de biochar de bois, taille: 100 et 10 µm (Blanc, 2013)

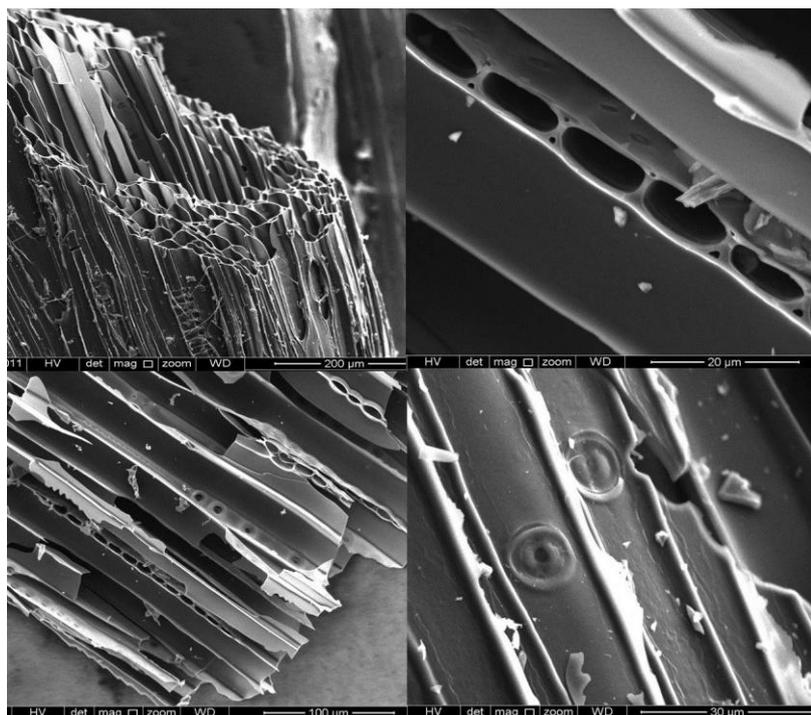


Fig n° 8: Micrographies SEM, Structures vasculaires de sapin produit à une pyrolyse (500°C, 30 min). 50 µm (Cimò, 2013).

Le biochar comporte deux parties : l'une est stable et l'autre est facilement dégradable. Ainsi, il peut rester longtemps des centaines à des dizaines de milliers d'années dans le sol en raison de ses propriétés stables. L'oxydation initiale rapide en surface du biochar frais est due à des processus abiotiques plutôt que des processus biotiques (Cheng et al., 2020).

En effet, les biochars produit de la pyrolyse, sont des solides stables et de nature récalcitrant à la décomposition microbienne comparativement à sa matière première. Mais le biochar pourrait contenir quelques proportions de matière organique facilement dégradable. Cette matière peut être utilisée comme source d'énergie par les microorganismes hétérotrophes, ce qui constitue la première étape de la décomposition des biochars (Lehman et al., 2006). Les quantités et les qualités du biochar produites sont très variables, elles dépendent de la nature du produit choisi (animale ou végétale), sa composition (linigne, cellulose...) ainsi que des processus de pyrolyse utilisés (Binh et Lehmann, 2009).

Ainsi, lorsque ce carbone est enfoui dans le sol, il y est non seulement stocké de façon permanente, mais il améliorerait aussi les propriétés agronomiques. Au lieu qu'il soit rejeté dans l'atmosphère, le CO₂ contenu dans les végétaux peut ainsi être enfoui de manière utile et durable dans le sol. Il agit comme des puits durables de carbone en séquestrant du carbone provenant du CO₂ de l'atmosphère et lutte à long terme contre les changements climatiques (Kammann et al., 2011).

Parmi le large éventail de pratiques agricoles de conservation, le biochar peut s'avérer un outil essentiel et accessible pour la conservation des sols pour une agriculture durable, car il pourrait efficacement séquestrer une grande quantité de carbone dans le sol à court et à long terme, améliorant ainsi la fertilité des sols, la productivité des cultures et contribuer à atténuer le problème du réchauffement climatique. En outre, le biochar peut améliorer la capacité de production des sols soumis à différents stress biotiques et abiotiques, et faire progresser le problème de la sécurité alimentaire. Ce rapport a pour objectif principal de fournir un examen scientifique critique de l'état actuel (Wael et al., 2019).

1.2.2. Définition de la pyrolyse:

Le processus de fabrication du biochar, la pyrolyse, est un procédé où les molécules organiques de la biomasse végétale sont écrasées dans des conditions de température située entre 350°C et 1000°C, avec un niveau faible d'oxygène (< 2%). Environ 50% du carbone contenu dans les matériaux de base est retenu par le processus de pyrolyse; néanmoins, ce taux peut varier en fonction des conditions de pyrolyse (Atkinson et al., 2010). Selon les températures de pyrolyse, les composés organiques sont plus ou moins dégradés. L'hémicellulose se dégrade entre 200-260°C, la cellulose entre 240-350°C, et la lignine entre 280-500°C. Les proportions de ces composés influenceraient le degré de réactivité ainsi que la structure physique des biochars (Haddad, 2018).

La balle de riz, la paille de riz, la bouse de vache, le fumier de bovin, ovin fiente de volaille, la sciure et copaux de bois ...etc peuvent être utilisés pour produire du biochar et reste une des meilleures solutions pour obtenir un rendement satisfaisant. Ces matières organiques sont placées dans une chambre avec une quantité limitée d'oxygène maintenue, puis la chaleur est progressivement augmentée en utilisant le brûleur à flamme de gaz dans le bas et le milieu de la chambre jusqu'à 400-500 C pendant 4-5 h environ. Le biochar après la pyrolyse est laissé refroidir à température ambiante puis réduit en poudre, pesé et stocké pour l'application dans le domaine agricole (Rahman et al., 2020)

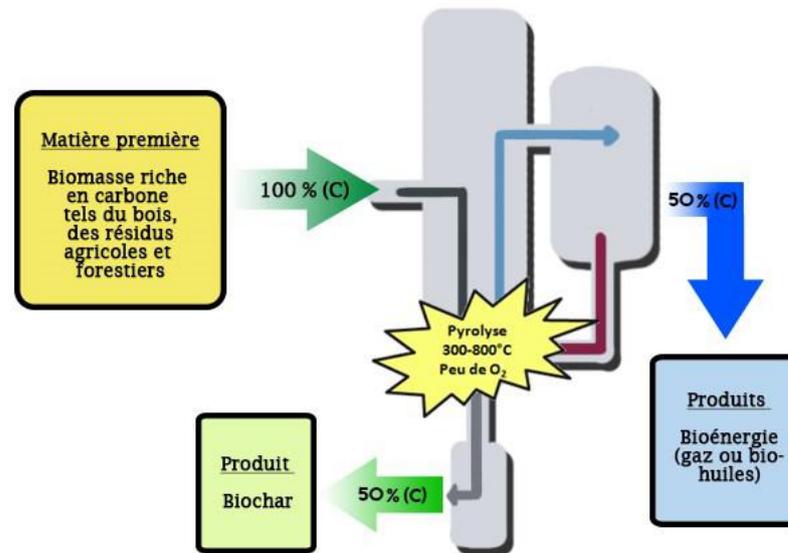


Fig 9: La production du biochar par le procédé de la pyrolyse.

Un matériel autre que le biochar, en se décomposant dans le sol, libère du carbone lentement au cours du temps, cette perte de carbone continue jusqu'à ce qu'il en reste environ 10-20% au final (selon la qualité du carbone et l'environnement). Donc finalement le biochar mènerait à une meilleure séquestration du carbone dans le sol (Lehmann et al., 2006). La conversion de la biomasse en biochar change fondamentalement les dynamiques de transformation en ce qui concerne la séquestration du carbone. En carbonisant la biomasse, 50% de son carbone est immédiatement libéré, laissant stable le reste du carbone dans le biochar (Fig 9).

Some toute, la proportion des différents produits issus de l'opération de pyrolyse des biomasses (biogaz, biohuile et biochar) ainsi que leurs compositions dépendent d'une part des conditions opératoires (vitesse de chauffe, température, flux de chaleur) mais aussi des propriétés physico-chimiques des biomasses concernées (teneurs en cellulose, hémicellulose, lignine, extractibles, minéraux et en eau) (Selmi, 2016).

1.2.3. Les fractions de la pyrolyse :

La pyrolyse est un procédé de carbonisation des matières organiques en absence d'oxygène ou sous très faible pression d'oxygène, elle conduit à la production :

- d'un mélange gazeux appelé "syngas" qui est un gaz combustible
- d'huile appelé "bio-oil"
- de biochar

1.2.3.1. La fraction gazeuse:

Quel que soit le type de biomasse convertie, la fraction gazeuse est majoritairement composée de monoxyde de carbone (CO), de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et de dihydrogène(H₂). Les autres molécules identifiées sont l'éthane (C₂H₆), l'éthylène (C₂H₄), et le propane (C₃H₈).

1.2.3.2. La fraction liquide :

Les bio-huiles sont des dispersions liquides pseudo-homogènes caractérisées généralement par une couleur brun-foncée et un dégagement de vapeurs âcres pouvant irriter les yeux après une période d'exposition prolongée. Ces huiles de pyrolyse, ayant des pH compris entre 2 et 3, sont obtenues par condensation des vapeurs de pyrolyse après une séparation plus ou moins efficace des particules de charbon. Les biohuiles contiennent typiquement plus d'une centaine de composés chimiques organiques, avec des teneurs variables en fonction de la nature de biomasse ligno-cellulosique et des conditions opératoires de pyrolyse et de condensation.

Toutefois, les principales familles de composés chimiques qui constituent ces biohuiles sont : les acides, les esters, les alcools, les cétones, les aldéhydes, les phénols, les sucres, et d'autres composés.

1.2.3.3. La fraction solide :

La fraction solide résiduelle de l'opération de pyrolyse des biomasses est appelée « char » ou « biochar » à laquelle on s'intéresse.

Une façon de capturer ce carbone est via la pyrolyse, la pyrolyse relâcherait une partie du dioxyde de carbone qu'elle contient (dans le syngas), mais une bonne partie (50%) du carbone que contenait la plante resterait stockée dans le résidu solide « le biochar ». Ce biochar peut ensuite être incorporé dans les sols lors des labours, afin que la géosphère (le sol) puisse absorber le carbone. On estime que le carbone séquestré par le biochar reste dans le sol pendant quelques siècles, voire quelques millénaires. Le biochar est durablement séquestré dans le sol, mis à part une légère perte estimée à 5% (Levesque, 2017). Les types utilisés pour la pyrolyse sont le fourneau TLUD et le fourneau ANILA.



Fig^o 10: Model d'un pyrolyseur industriel « CarboChar-3 » qui produit 5 tonnes de biochar par jour (pro-natura@wanadoo.fr, 2016)

1.2.4. Historique et concept du Biochar :

D'après Lehman (2007), Il y a plus de 6000 ans les indiens d'Amazonie « les amérindiens » utilisaient déjà une sorte de charbon végétal pour améliorer la fertilité des sols pauvres de la forêt amazonienne (Brésil). Ils enfouissaient dans leurs champs un compost enrichi de charbon et amélioraient ainsi sensiblement le produit de leurs récoltes. Aujourd'hui ces « terres noires » sont le résultat de l'accumulation des résidus de combustion lente des déchets organiques des communautés villageoises en bord de fleuve. Les études archéologiques ont montré que dans certains cas cette accumulation a pu avoir lieu sur plusieurs millénaires, prouvant la stabilité de ce type de fertilisant qui est « le biochar » par simplement une méthode primaires.

Ils découvraient que l'utilisation du charbon pouvait transformer leurs sols pauvres et infertiles en sols fertiles appelé « Terra Preta » qui signifie terre noire. La redécouverte des *Terra Preta* (Terre noire en Portugais) extrêmement fertile, qui est considéré aujourd'hui comme un des sols les plus fertiles au monde avec les rendements les plus élevés (Steiner, 2010). Ces peuples avaient créés un type de culture appelé « slash and char agriculture » qui consistait à couper les arbres de la forêt et ainsi que ceux issus du défrichage des champs et à carboniser cette biomasse plutôt que de la brûler complètement. Par la suite, ce charbon était incorporé dans le sol avec d'autres fertilisants naturels tels que les différents fumiers existants.

L'estimation de l'âge de « Terra Preta » fait elle-même débat, en effet elle permettrait d'avoir une durée minimale de la stabilité du biochar. Si Sombroek parlait en 2001 d'une datation carbone qui avait estimé l'âge du sol comprise entre 1 780 et 2 260 ans, ProNatura parle de parcelles datant de 8000 av JC., soit aux prémices de l'agriculture, Biofuel Watch parle de 500 et 2500 ans d'ancienneté, Mae-Wan Wo date les installations de 450 avant J.C. à 950 après J.C. On voit donc clairement qu'il y a une difficulté de dater cette terre et que les estimations varient beaucoup selon les auteurs, et leur convictions sur le biochar (Blanc, 2013) .

La majorité des sites de *terra preta* ont été découverts en Amazonie centrale, et dans la région d'Upper Xingu au Brésil. Il y a d'autres sites dans des régions amazoniennes du Pérou, de la Colombie, au sud du Venezuela, et dans les Guyanes. Cela représenterait 10 % des surfaces de l'Amazonie soit la taille de la France, avec des zones allant de l'hectare à plusieurs kilomètres carrés (Glaser et al., 2002). En Afrique, il a été découvert des sols similaires au Bénin, au Libéria et dans les savanes de l'Afrique du Sud. Les recherches se sont orientées essentiellement dans les régions d'Amérique latine, mais peu en Afrique (Lange et al., 2018).

Les « *terra preta* » ont un stock plus élevé de matière organique par rapport aux sols alentours. La formation d'un grand stock d'humus stable à l'intérieur de ces sols est probablement la clé de leur productivité. Les sols de ces régions amazoniennes sont riches en kaolinite, cette argile a un faible potentiel de complexation avec la matière organique. Par contre, les oxydes de Fe et Al adsorbent fortement le carbone organique. Les *terra preta* contiennent des taux élevés de matière organique (MO) labile (instable) et stable, leur attribuant cette couleur si noire (Glaser et al., 2002).

La « Terra Preta » est un sol très fertile à long terme. Cinq sites en Amazonie centrale contiennent en moyenne 50 tonnes de biochar par hectare par mètre de profondeur, soit un enrichissement d'un facteur de 70 par rapport aux sols adjacents, d'autres sources mentionnent des taux de carbone organique de 9% dans les *terra preta* alors que les taux des sols alentours seraient de 0,5 % (Atkinson et al., 2010), avec une capacité de rétention cationique (CEC) élevée et stable, il est aussi riche en phosphore, calcium et magnésium et regorge une diversité de microorganismes du sol. Une augmentation de 25 % de la diversité microbienne a été enregistrée dans la « Terra Preta ». Ce carbone serait un facteur clé du maintien des niveaux élevés de la MO et de disponibilité des nutriments. Cet élément est caractérisé comme stable, il persiste dans l'environnement pendant des siècles grâce à sa récalcitrance chimique et biologique due à sa chaîne polyaromatique. Il a été trouvé sous forme de particules non protégées, piégées physiquement, pouvant être complexé avec les minéraux du sol (Glaser et al., 2002).

Les travaux de recherche effectués par les pédologues, écologues et les archéologues ont permis d'identifier aussi dans ces sols les déchets de cuisine, les os de poissons et d'animaux, des morceaux de pots en céramique et des traces de déchets organiques des communautés villageoises en bord de fleuve. Les études archéologiques ont montré que dans certains cas cette accumulation a pu avoir lieu sur plusieurs millénaires, prouvant la stabilité de ce type de charbon. C'est pourquoi ces sols ont été qualifiés « d'anthrosols » qui signifie sol créé par l'action de l'homme (Lehmann et Kleber, 2015).

L'analyse moléculaire des restes de charbon du sol identifiés dans « Terra Preta » laisse penser que si une partie du charbon provenait du bois brûlé lors du défrichage, une autre partie, plus significative en profondeur est un charbon provenant de la combustion incomplète des déchets agricoles ou du bois dans les foyers.

Des sols similaires aux « Terra Preta » ont été également découverts en Europe du Nord-Ouest (Plaggen soils ou anthroposols) en Nouvelle Zélande (jardins de Maori). L'utilisation du biochar pour amender les sols est une tradition millénaire, qui n'a été redécouverte que récemment (Haddad, 2018). Aujourd'hui, des travaux de recherche plus poussés sur le biochar recherchent ses origines et

son utilisation en passant par ses impacts sur l'amélioration de la fertilité des sols tropicaux et pauvres confrontés à une forte dégradation. L'introduction du biochar qui a existée depuis des années a amélioré les sols du Brésil ; une fertilisation qui a réussie à changer les propriétés de ces sols qui dans certaines régions avaient une profondeur de 1 jusqu'à 2m (Lehmann, 2007). En conséquence l'idée sous entendue derrière le concept biochar n'est pas de reproduire le système de culture tel que pratiqué à l'aire de la civilisation des amérindiens, mais d'identifier un élément de ce système « le charbon » dans l'espoir de créer des sols qui deviendront aussi fertiles et riche en carbone à long terme comme « terra preta ».



À gauche une terre locale très pauvre et presque inculte;
à droite, un sol transformé en terre fertile pour des centaines d'années.

Fig n°11 : Photos de deux terre d'Amazonie avec et sans le biochar (Woolf et al., 2010).

Les terra preta sont réparties de manière inégale dans les zones des habitations historiques, d'une superficie moyenne de 20 ha, mais avec des sites individuels pouvant aller jusqu'à 350 ha signalés jusqu'à présent (Glaser et al., 2002 ; Sohi et al., 2010).

1.2.5. Utilisation du biochar à travers le temps :

L'usage de « biochar » remonte bien avant le 20^{ème} siècle dans certaines régions du monde (Amérique du sud, Japon, Chine.. etc). Par exemple, en 1857, des preuves d'observations sur presque toutes les fermes de l'effet de poussière du charbon de bois, sur le développement et l'accélération de la croissance végétale. Au Japon, les recherches sur le «biochar » ont significativement été intensifiées durant le début des années 1980. Ce même amendement a été également conseillé comme terreau pour la production horticulaire dans certains pays d'Amérique du sud. En 1929, Morley écrit dans la première publication de « *The National Greenkeeper* » que « *le charbon de bois agit comme une éponge dans le sol, absorbe et retient l'eau* ». Il remarque même que « *comme un purificateur du sol et un absorbant d'humidité, le charbon de bois n'a pas d'égal* » et les produits du charbon de bois seront commercialisés à partir de l'année 1933.

En effet, cette aptitude est liée à ses propriétés chimiques et physiques spécifiques, telles qu'une haute densité en charge aboutissant en une plus grande rétention d'éléments nutritifs, et à sa grande résistance à la dégradation microbienne par rapport aux autres matières organiques du sol (Cantrell et al., 2012).

Les premières notes sur le sujet des *terra preta* datent des années 1870. Le fort intérêt pour ces sols a augmenté à partir des années 1970. Les recherches subissent un important essor, avec une multiplication par 5 du nombre de publications entre les années 1970 et 2000. Beaucoup de personnes s'intéressent à ces sols afin de comprendre leur formation et leur fertilité, mais aussi pour la séquestration du carbone dans les sols (Whitman et Lehmann, 2009).

A travers le monde, le biochar a eu un effet positif significatif sur le rendement dans de nombreux essais. Les effets des principaux facteurs contributifs étaient le pH du sol, le type de sol, l'ajout des engrais, la matière première du biochar, les doses d'application et les espèces cultivées (Wael et al., 2019).

Lehmann et al., (2006) ont montré que les « biochars » utilisés comme amendement semblent être généralement basiques (pH > 7). Alors qu'il s'est avéré que les « biochars » peuvent être produits à des pH compris entre 4 et 12. Lehmann, (2007), a démontré qu'il y a une augmentation de pH de 2,5 unité après une petite période d'incubation de 4 mois dans le sol.

La stabilité du biochar peut être expliquée par la formation d'anneaux aromatiques extrêmement récalcitrants durant la pyrolyse (Cheng et al., 2006). Cette stabilité dans les sols est affectée par les conditions climatiques, le type de sol, la composition du biochar et les paramètres de sa production (Lehmann et al., 2011).

Le biochar suscite un intérêt agronomique depuis plusieurs années, en particulier après la découverte en Amazonie de la fertilité des Terra Preta, ces « terres noires ». La stabilité du biochar dans le sol est une question fondamentale puisque que seule une longue période de résidence peut assurer une séquestration durable du carbone. La conversion de la biomasse en biochar change fondamentalement les dynamiques de transformation en ce qui concerne la séquestration du carbone. En carbonisant la biomasse, 50% de son carbone est immédiatement libéré, laissant stable le reste du carbone dans le biochar. Un matériel autre que le biochar, en se décomposant dans le sol, libère du carbone plus lentement au cours du temps. Cependant, cette perte de carbone continue jusqu'à ce qu'il en reste environ 10-20% au final (selon la qualité du carbone et l'environnement). Donc finalement le biochar mènerait à une meilleure séquestration du carbone dans le sol (Lehmann et al, 2006; Lehmann 2007). Signalons que les résultats de certaines études scientifiques sont contradictoires, et aussi bien une décomposition rapide qu'une décomposition lente des biochars sont constatées (Binh et Lehmann, 2009).

Le biochar utilisé comme amendement pour améliorer la qualité des sols et l'amélioration des rendements des cultures est devenue une priorité mondiale. Certains biochars ne sont pas capables d'être le facteur d'amélioration de la fertilité des sols pour augmenter la productivité des cultures, d'autres ont entraîné des améliorations acceptables dans certaines conditions pédo-climatiques. La sélection de certaines matières premières, conditions de pyrolyse et taille des particules a été conçue

pour créer des biochars qui pourraient cibler l'amélioration des caractéristiques spécifiques du sol et les besoins de la culture pour enfin atteindre les rendements escomptés surtout dans les sols agricoles dégradés pauvres en nutriments ou contaminés (Novak et al., 2013).

Au Japon, il existe une longue tradition d'utilisation du charbon de bois comme amendement des sols. Chose qui est relativement bien connue dans ce pays, bien que l'application réelle du charbon de bois soit limitée en raison de son coût élevé (Dominic, 2008).

Les conditions de formation sont similaires à celles de la production du charbon de bois lors de la carbonisation dans des charbonnières traditionnelles (avec peu d'oxygène). Afin de le différencier du charbon de bois, la définition adoptée par « l'international Biochar Initiative (IBI) » spécifie que la finalité de cette substance est son potentiel d'utilisation future en tant qu'amendement pour les sols agricoles. Bien que le terme « biochar » soit un concept moderne et que son retour au sol apparait, sans aucun doute, comme une piste de recherche nouvelle et prometteuse, la réalité est que depuis plusieurs siècles, le biochar a été utilisé pour améliorer la qualité des sols (Haddad, 2018).

Des expérimentations ont été conduites pour divers sols et sous des climats variés pour notamment évaluer l'intérêt agronomique de l'addition de biochar au sol. Dans la littérature scientifique les quantités de biochars appliquées sont, cependant, très variables, tout comme la nature des biochars utilisés. Dans une synthèse de Hall et Keynes., (2007); ont remarqué la grande variété des taux d'application des biochar (0.5 à 135 t/ha) sur les sols. Chan et al (2007) étudient l'effet de biochar sur la productivité des plantes et la qualité des sols en l'appliquant à des taux allant de 10 à 100 t/ha.

Non seulement le biochar peut enrichir les sols en y augmentant fortement et durablement le taux de carbone, mais encore les sols enrichis par du biochar se développent naturellement plus en profondeur. Par conséquent, le carbone total stocké dans ces sols peut être d'un ordre de grandeur plus élevé que les sols adjacents. La Gambie, le Ghana, le Lesotho, le Mozambique, le Niger, le Sénégal, le Swaziland, la Tanzanie, l'Ouganda, la Zambie et le Zimbabwe ont tous défendu la méthode du stockage du carbone dans les sols, surtout par la technique du biochar, qui devrait devenir un produit du marché mondial des crédits carbone, qui est le mécanisme par lequel l'émission et l'absorption du carbone sont sanctionnées et récompensées financièrement. Ces pays sont convaincus qu'il s'agit d'un moyen de lutter contre les changements climatiques, assurer la sécurité alimentaire et énergétique régénérer les sols dégradés (FAO, 2017).

Afin de restaurer la fertilité des sols fortement dégradés, les travaux sur l'utilisation du biochar dans les agro-systèmes ont porté essentiellement sur l'apport unique de biochar (Glaser et al., 2002) ou en mélange avec des engrais minéraux ou alors avec des matériaux tels que composts, lombricomposts, fumier...etc sont des sources durables de nutriments disponibles pour les plantes (Steiner et al., 2007; Sohi et al., 2010 ; Liang et al., 2008). Car le biochar est considéré comme un matériau pauvre en éléments nutritifs (Glaser et al., 2002). Toutefois, les mécanismes permettant aux biochars d'améliorer la fertilité des sols tout en stockant du carbone à long terme restent largement inconnus.

1.2.6. La situation du biochar en Algérie :

1.2.6.1. Essai du biochar au sud d'Algérie :

En Algérie, une des premières évaluations au niveau de la micro-ferme écologique et innovante est celle de « la Clé des Oasis » à Timimoun dans le sud d'Algérie. Une opération lancée depuis le mois de janvier 2019 sur des planches de cultures pour des légumes en intercalaires, des cuvettes sous les palmiers dattiers pour des légumes et des arbres fruitiers avec un amendement à base de charbon végétal appelé « Crescilis **TERRA FERTILIS®** ». (Anonyme, 2019).

1.2.6.2. Les propriétés du Crescilis :

Selon Anonyme (2019) ; le Crescilis **TERRA FERTILIS®**, est un amendement organique composé à 100% de charbon végétal, issus d'essences de bois pures provenant de forêts françaises durablement gérées. Il est pourvu d'une très grande porosité, d'une haute teneur en carbone (>90%) et d'éléments minéraux indispensables au bon développement des végétaux. Le charbon végétal Terra Fertilis® améliore la qualité du sol et peut absorber jusqu'à 4 fois son poids en eau et la restituer progressivement à la plante Utilisable en agriculture biologique.

1.2.6.2.1. Les avantages de cet amendement :

- Améliore la qualité du sol et sa fertilité à long terme.
- Bonne rétention de l'eau.
- Réduit les besoins en engrais chimique.
- Séquestre du CO₂

Les premiers résultats obtenus avec l'utilisation du charbon végétal " **le Crescilis**", un biochar pur et de haute qualité fait de 100% de bois (duramen : partie centrale du bois) sur les paramètres suivants:

- La qualité du substrat et de la structure du sol.
- La rétention de l'eau « hydro-rétenteur ».
- Du taux d'humidité de la germination.
- La résistance des plantes à la sécheresse.
- Le système racinaire.
- La densité végétative et vitalité des plantes.
- La protection phytosanitaire et de la défense des plantes.
- La productivité au m² et de la qualité des produits.

1.2.6.2.2. Quelques rendements comparatifs sur quelques cultures annuelles avec et sans crescilis :

- Pomme de terre/m² : sans crescilis : **6 kg/ m²** - avec crescilis : **12 kg/m²**
- Orge variété locale / m² : sans crescilis : **0,50 kg/m²** – avec crescilis : **1,2 kg/m²** - possibilité 2 fois par an.
- Blé dur variété locale / m² : sans crescilis : **0,40 kg/m²** - avec crescilis : **0,9 kg/m²**
- Fèves : sans crescilis : **4, 50 kg/m²** - avec crescilis: **9 kg/m²**
- Navet : sans crescilis: **3,50 kg/m²** - avec crescilis **10 kg/m²**
- Laitue : sans crescilis : **6 kg/m²** - avec crescilis: **8 kg/m²**
- Céleri branche : sans crescilis **25 céleri/m²**- avec crescilis : **60 céleri /m²**
- Gombo/ plant : sans crescilis **4 kg/Plant** - avec crescilis : **5 kg/plant**
- Courgette/ plant : sans crescilis **5,5 kg/plant** - avec crescilis : **8 kg/ plant**

Les résultats obtenus ont démontré une hausse spectaculaire et rapide des rendements (pratiquement doubler avec certaines cultures). Quatre échantillons de sol ont été pris pour des analyses de sol pour les cultures annuelles selon les différents traitements étudiés :

- Sol sans aucun amendement (Témoin)
- Sol avec du fumier
- Sol avec du fumier et du crescilis
- Sol avec du Crescilis

Le biochar utilisé comme additif a donné des résultats assez satisfaisants sur plusieurs spéculations à savoir :

1.2.6.2.3. La production animale comme additif dans l'alimentation des animaux d'élevage confondus :

- Augmentation du rendement laitier
- Amélioration de l'engraissement.
- Augmentation de la production de viande rouge.
- Amélioration de la production d'œufs.
- Augmentation de la production de viande blanche.

1.2.6.2.4. La santé animale :

- Régulation de la digestion.
- Stabilisation du milieu microbien dans l'appareil digestif.
- Il constitue un véritable pansement gastro-intestin.
- Il permet d'éviter les problèmes sanitaires tels que les troubles intestinaux les diarrhées.
- L'amélioration de l'hygiène et réduit les odeurs.
- La protection contre les agents pathogènes dangereux (résistant à certaines maladies).
- une réduction des risques de maladies contagieuses.

1.2.6.2.5. La production fourragère :

- Une augmentation de la valeur nutritive des fourrages.

1.2.6.2.6. L'environnement :

Dans le monde entier, on constate un intérêt croissant dans l'utilisation du biochar dans l'agriculture pour aider à atténuer le réchauffement et l'amélioration de la productivité des cultures. Une augmentation des émissions de N₂O a été constatée à la suite de l'application d'engrais azotés, de l'incorporation des résidus de culture et l'épandage de déchets organiques liquides et de biosolides sur des terres. Les plaques d'urine dans les pâturages pâturés peuvent être une source dominante N₂O ainsi que les sources de méthane. L'influence du biochar sur ces gaz à effet de serre autres que le CO₂ a été prouvée par plusieurs auteurs comme Agegnehua et al., (2015) et Fidel et al., (2017) qui ont prouvé qu'il y aurait une réduction significative de leurs émissions. La suppression éventuelle des rejets de méthane et d'oxyde nitreux augmenter la valeur du biochar en tant que moyen de compenser les gaz à effet de serre agricoles.

Chez le ray-grass cultivé dans un sol limoneux-sableux, des mélanges ont été utilisés avec des quantités égales de biochar de coque d'arachide riche en azote, compost et le mélange des deux (Biochar+compost). Il s'est avéré que le biochar avec ou sans compost a permis de réduire considérablement les émissions de N₂O, tandis que le rendement a été considérablement augmenté avec le traitement Biochar+compost. Dans la deuxième expérience, du biochar de coque d'arachide, biochar de maïs et biochar de copeaux de bois, ont été mélangés au sol, tous ces biochar ont réduit les émissions de d'environ 60 % dans des conditions de plein champs (Wang et al., 2010).

Dans une autre étude quatre traitements ont été effectués avec le fumier de bovin (42 t/ha), biochar de bois dur (22,4 t/ha), Biochar et fumier combinés, N₂O contrôlé, ont été menés sur un sol calcaire irrigué. Les flux de gaz à effet de serre ont été mesurés en utilisant des chambres ventilées, chez le maïs (*Zea mays* L.) N₂O sur une période de 2 ans. Avec le biochar de bois seul 20 % de moins de CO₂ et 50% moins d'émissions de gaz ont été enregistrés, selon Lentz et al., (2014), ceci pourrait être expliqué par le fait que le biochar a altéré les processus de nitrification (la minéralisation de l'azote limitée suite à la rétrogradation de l'azote NH₄⁺ par le biochar).

Un autre essai sur l'influence du biochar et le compost sur le rendement du maïs a été étudié sur un sol tropical. Les traitements sont:

a- Engrais (F) contrôle;

b-10 t/ha biochar + engrais (B+F);

c-25 t/ha compost + engrais (Com+F);

d-2,5 t/ha biochar + 25 t/ha (B+F).

La biomasse aérienne et le rendement du maïs ont été sensiblement améliorés avec tous les amendements organiques par rapport à l'engrais (F contrôle), avec une augmentation du rendement des céréales entre 10 et 29 % pour le compost et le biochar respectivement. Les émissions de CO₂ et de N₂O étaient significativement les plus élevées avec l'engrais inorganique(F). Cependant, les émissions de N₂O étaient faibles et ont généralement diminué au fil du temps avec le biochar (Agegnehu et al., 2016).

Cet essai a examiné les effets du biochar et du compost, sur un Ferralsol dans le nord du Queensland, en Australie chez les arachides. Le mélange biochar-compost a considérablement amélioré la disponibilité des nutriments et le rendement. Les flux de CO₂ et le N₂O ont été les plus faibles pour le traitement biochar seul par rapport au compost et au contrôle (Agegnehu et al., 2015).

Les effets du biochar de bois sur les gaz à effet de serre (GES) et les rendements du riz et du blé dur ont été évalués à l'aide d'unr expériences en plein champs dans un sol de montagne. Il s'est avéré que l'amendement du biochar a diminué sensiblement les émissions d'oxyde (N₂O) jusqu'à 54 % et 53 % chez le riz et le blé dur respectivement. Les amendements au biochar ont augmenté la production du riz et le blé, respectivement de 12 % et 17 %. D'après Wang et al., (2012), ces augmentations de rendement peuvent être en partie attribuées aux augmentations de la rétention des nitrates du sol par le biochar.



Fig n°12 : Apport de biochar dans le sable au sud d'Algérie (Timimoun)

(pro-natura@wanadoo.fr, 2016)



Fig n°13 : Essai avec et sans biochar sur fève (*Vicia faba major* L.) à l'ensa



Fig n°14: Levée hétérogène des plants de fève avec et sans biochar (ensa)



Témoin 0%

30%

20%

10%

Fig n°15: Développement des plants de Fève avec et sans biochar (ensa)



30%

20%

10%

Fig n° 16: Volume des racines pour les différentes doses de biochar (ensa)



30%

20%

10%

T

Fig n°17: Développement des plants de fève par rapport au témoin (ensa)



Témoin



10%



20%



30%

Fig n°18: Les feuilles de la fève avec les différentes doses (ensa)

La production de biochar peut être chimiquement décrite par l'élimination de l'eau suivie d'une condensation aromatique croissante, qui peut être exprimé en rapports atomiques décroissants de O/C et H/C. Cette innovation consiste à récupérer des résidus agricoles inutilisés ou d'autres types de biomasse renouvelable non valorisable d'une autre façon, pour les carboniser par pyrolyse en continu. Par exemple les pailles de blé, de riz, tiges de coton, de mil, cannes de maïs, balle de riz, parchets de café, bambous, grignons d'olives, palmes séchées, peuvent être utilisés pour fabriquer le biochar. Le bois peut également être carbonisé sous toutes ses formes et sources, y compris la sciure avec un rendement environ 2 à 3 fois supérieur aux procédés de carbonisation classiques (bruler). Cette technologie innovante est basée sur l'utilisation d'une enceinte chauffée à 550°C au travers de laquelle s'écoule la biomasse en l'absence ou avec peu d'oxygène. La température de la cornue est maintenue constante par la combustion des gaz de pyrolyse qui sont recyclés et brûlés dans une chambre de post combustion, évitant ainsi l'émission de gaz à effet de serre (GES) (Galinato et al., 2011).

1.2.7. Les propriétés du biochar :

1.2.7.1. Propriétés physiques des biochars :

Les biochars sont des matériaux carbonés constitués essentiellement de composés aromatiques et comportant des zones organisées en feuillets sous forme de plans graphitiques qui sont très stables thermodynamiquement. La structure d'un biochar donné est généralement très complexe et dépend d'une combinaison de plusieurs facteurs tels que la nature et la structure de la biomasse initiale, le type de réacteur de pyrolyse, la température finale et la vitesse de chauffe. La structure des biochars est analysée généralement au moyen de différentes techniques analytiques telles que la spectroscopie Raman, la résonance magnétique nucléaire (RMN), la diffraction des rayons X, etc. L'augmentation de la température de pyrolyse induit généralement une augmentation de la teneur en composés aromatiques. A titre d'exemple, les biochars issus des déchets de coque de riz ont été analysés par la résonance magnétique nucléaire (RMN) du ¹³C. Les résultats montrent que le pourcentage de répartition des groupements aromatiques varie en fonction de la température : il augmente de 34% à 90% lorsque la température de pyrolyse augmente de 400 à 800°C, respectivement (Lange et al., 2018).

L'espace libre entre les feuillets graphènes constitue la porosité du carbone. Ainsi, la structure d'un biochar est caractérisée par son volume poreux, la taille et la forme de ses pores et sa surface spécifique. La microporosité des biochars est en relation directe avec leurs surfaces spécifiques (La surface spécifique désigne le rapport de la superficie de la surface réelle d'un objet et de la quantité de matière de l'objet. On l'exprime donc généralement comme une aire massique, en unités de surface par unité de masse). En effet, plus la structure du biochar tend vers une structure graphitique, plus les espaces inter-feuillets sont étroits et plus la surface spécifique augmente (Brodowski et al., 2006; Liang et al., 2006).

Il est important de noter que la texture des biochars dépend fortement de la nature de la biomasse initiale et de la température de pyrolyse. Lorsque la température de pyrolyse s'élève, la surface spécifique, le volume poreux et le nombre de micropores augmentent généralement du fait de l'élimination des matières volatiles (Liang, 2006). De plus, la structure commence à s'ordonner avec la formation d'empilements aléatoires de feuillets de graphène ondulés. Lehmann et al., (2011); Liang et al., (2006) ont étudié l'influence de la température de pyrolyse sur les propriétés texturales des biochars issus de la pyrolyse de bois d'Hévéa. Les résultats ont révélé que lorsque la température de pyrolyse augmente de 300°C à 700°C, le diamètre moyen des pores diminue progressivement et le nombre de micropores augmente avec l'élimination des matières volatiles.

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 et al., 2006). De plus, les cycles des divers éléments nutritifs du sol (fixation, précipitation, immobilisation et minéralisation) sont aussi fortement impliqués par le processus de rétention ainsi que les microorganismes qui y participent (Li et al., 2020). 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. En effet, l'une des qualités les plus attrayantes du biochar est sans doute son pouvoir de retenir les nutriments et donc d'augmenter la fertilité des sols, offrant ainsi une meilleure disponibilité des nutriments à la plante (Laurin-Lancôt, 2015).

1.2.7.2. Les propriétés chimiques des biochars :

D'un point de vue chimique, le biochar est une matrice composée principalement de carbone (C: 70-90% en masse sèche). Après le carbone, les éléments les plus abondants sont l'oxygène et l'hydrogène.

Comme pour le cas des propriétés physiques, elles dépendent non seulement de la nature et du type de biomasses mais également des conditions opératoires du processus de pyrolyse. D'un point de vue agronomique, la caractérisation chimique des biochars est importante puisqu'elle est directement liée à la croissance de micro-organismes dans le sol ainsi qu'au développement et la croissance des cultures. Les teneurs en cendres et en carbone fixe des biochars augmentent d'une façon significative avec l'augmentation de la température de pyrolyse, tandis que les teneurs en matières volatiles diminuent considérablement avec l'augmentation de la température (Laird et al., 2010).

Selon Kyle et al., (2010), le carbone total (C_{tot}) du biochar peut contenir les différentes formes de carbone à savoir organique (C_{org}), inorganique (C_{inorg}) et graphitique (C_{graph}). Ces différents types de carbone peuvent nous donner une idée sur leur transformation potentielle dans le sol. Nous nous attendons à ce que le C_{graph} soit le plus stable dans le sol. Le C_{inorg} correspond principalement au CaCO₃.

Les méthodes de dosage utilisées :

Corg Teneur en carbone organique % $C_{org} = C_{tot} - C_{inorg}$

Cgraph Teneur en carbone graphitique % Combustion Spectroscopie à infrarouge

Cendres Teneur en cendres % Perte au feu Four à moufle.

1.2.7.3. Les teneurs en matières volatiles, en cendres et en carbone des biochars :

Les teneurs en matières volatiles et en carbone dépendent également de la nature de la biomasse ainsi que des teneurs en minéraux présents dans la biomasse brute. Les teneurs en cendres, et en carbone des biochars augmentent d'une façon significative avec l'augmentation de la température de pyrolyse, tandis que les teneurs en matières volatiles diminuent considérablement avec l'augmentation de la température. A titre d'exemple, lorsque la température de pyrolyse augmente de 300 °C à 600 °C, les teneurs en cendres et en carbone des biochars issus de la pyrolyse des branches d'arbres de pomme augmentent de 6,72% à 9,40% et de 32,5% à 75,34% respectivement, tandis que la teneur en matières volatiles diminue de 60,77% à 14,86%.

Aller., (2016), a montré que les biochars issus de la pyrolyse des biomasses riches en lignine et en cellulose possèdent des teneurs en matières volatiles relativement élevées (84,8% et 71,2%), suivis des biochars produits lors de la pyrolyse de fumier et les déchets de coquilles de noix (66,9% et 61,1%). Tandis que les teneurs en matières volatiles pour les biochars issus de la pyrolyse d'algues et des noirs de carbone sont les plus faibles en comparaison aux autres biomasses (56.0%, 23.4% respectivement).

1.2.7.4. La composition en éléments minéraux des biochars :

D'un point de vue chimique, le biochar est composée principalement de carbone (C: 70-90% en masse sèche). Après le carbone, les éléments les plus abondants sont l'oxygène et l'hydrogène.

En plus de la fraction carbonée, les biochars possèdent aussi une teneur en matières minérales relativement importante. Elle est essentiellement composée des métaux alcalins (K et Na), alcalino-terreux (Mg et Ca) qui sont présents souvent sous forme de carbonates. La concentration en matières minérales des biochars varie selon la nature de la biomasse et la température de pyrolyse. Elle est en générale faible pour les biochars issus du bois mais augmente avec les espèces herbacées et devient significativement élevée pour les déchets urbains et les déjections animales (Chen et al., 2020). La nature et la teneur en minéraux sont notamment affectées par la température de pyrolyse en raison de la volatilisation de certains éléments. La présence des fractions minérales dans les biochars est généralement recherchée lors de leurs applications dans le secteur agricole et/ou environnemental. En effet, les composés minéraux tels que le Ca, Mg, K et P peuvent permettre au biochar d'agir comme une source directe d'apport de nutriments au profit des plantes.

Le pH d'un biochar augmente avec l'augmentation des teneurs en minéraux dans les biochars. Yuan et al., (2011) ont montré que les métaux alcalins (Na et K) ou alcalino-terreux (Ca et Mg) présents

sous forme de carbonates, sont les principales substances alcalines responsables d'une augmentation du pH. Ils ont montré une corrélation positive entre l'alcalinité du biochar et sa teneur en cendres.

En fait, la présence des fractions minérales dans les biochars est généralement recherchée lors de leurs applications dans le secteur agricole et/ou environnemental. Car les composés minéraux tels que le Ca, Mg, K et P peuvent permettre au biochar d'agir comme une source directe d'apport de nutriments au profit des plantes (Xu et al., 2013).

1.2.8. Impacts des biochars sur les propriétés de sols agricoles :

L'ajout de biochars aux sols agricoles comme amendements peut induire des modifications potentielles des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques des sols. Les paramètres affectés directement sont principalement la porosité, la densité apparente, la stabilité des agrégats, la capacité de rétention en eau et en nutriments, la capacité d'échange cationique (CEC) du sol, le pH des sols, la composition et l'activité microbienne.

L'application de biochar peut également avoir des effets négatifs sur la qualité de l'environnement et la santé humaine à cause de composés nocifs qu'il contient tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les dibenzodioxines polychlorées et les dibenzofuranes (El-Naggar et al., 2019).

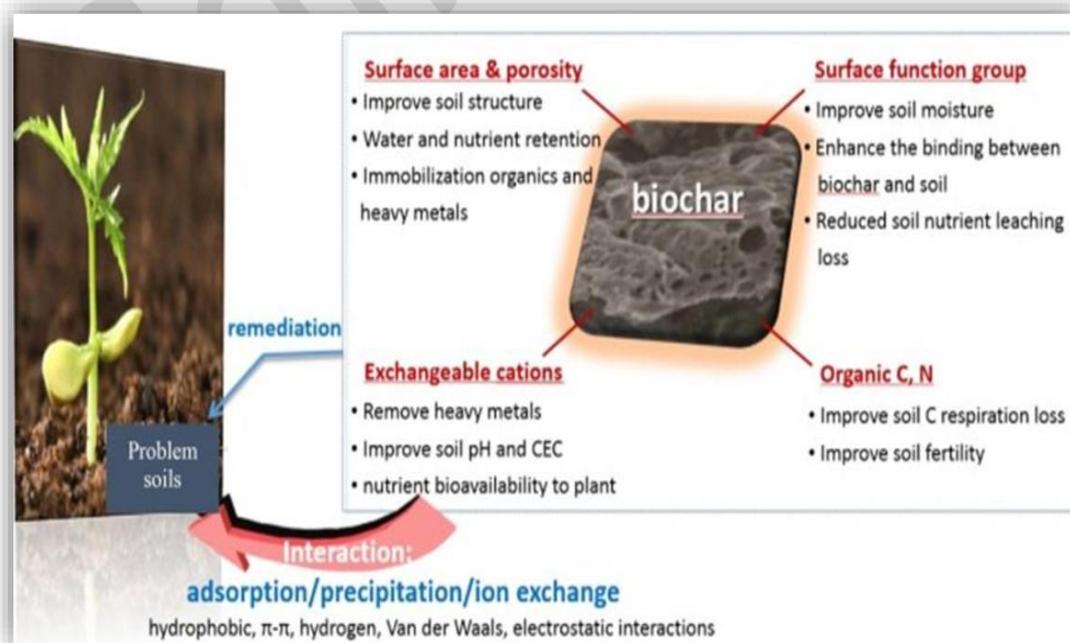


Fig n°19: Interaction plante, sol et biochar (Laurin-Lanctôt, 2015).

1.2.8.1. Effet sur les propriétés physiques des sols :

L'addition de biochar aux sols agricoles induit une amélioration de la capacité de rétention en eau grâce à sa nature poreuse. En effet, l'application de biochars dans des sols sableux augmente la rétention d'eau, tandis que pour les sols à texture moyennes (argilo- ou limoneux) n'a que peu voire pas d'effet. Les propriétés hydriques varient grandement entre les biochars, elles sont beaucoup influencées par la granulométrie, la porosité du biochar et la quantité de cendre (très sorbantes) (Haddad, 2018).

Dans ce contexte, Novak et al., (2014) ont examiné l'effet de l'ajout de neuf biochars, préparés à partir de quatre biomasses (coques d'arachide, noix de Pecan, litière de volaille et le Panic érigé) pyrolysées à différentes températures, dans un sol sablonneux et deux sols à texture fine (argiles sableuses, et limono- argilo-siliceux contenant plus de 35% d'argile) sur la capacité de rétention de l'eau. Ces auteurs ont montré que l'addition des biochars de Panic érigé et du bois dur pyrolysés à hautes et à basses températures (250-700°C) au sol (sablo-argileux) a entraîné une augmentation de l'ordre de 20% de sa capacité de rétention d'eau. La capacité d'eau disponible d'un sol sablo-limoneux augmente d'environ 1% pour chaque pourcent de dose de charbon de bois ajouté. Seuls les sols sableux voyaient leur teneur en eau fortement augmenter (plus que doublement). Il n'observait aucun changement dans les sols limoneux et les sols argileux perdaient même un peu de leur capacité à retenir l'eau, les sols à texture grossière ou très macroporeux seraient donc les seuls à profiter de bénéfices hydriques permis par le biochar (une expérience a par exemple montré que la teneur en eau d'un sol sablonneux passait de 18% à plus de 45% (en volume) suite à l'apport de charbon de bois) (Nyami-bonaventure, 2015).

Il est important de noter qu'une rétention en eau plus élevée dans le sol amendé de biochar a permis de réduire le nombre d'irrigations tout en maintenant des cultures à haut rendement. Par ailleurs, l'ajout de biochars aux sols agricoles affecte également leur stabilité structurale qui se traduit par une augmentation de la stabilité des agrégats des sols de 3% à 226% (Blanc, 2013). En résumé, l'effet positif de l'ajout de biochars sur les propriétés de sols agricoles dépend de plusieurs facteurs tels que le type du sol, le type et la dose de biochars appliqués.

La densité apparente de tous les biochars est très faible, les valeurs les plus élevées proviennent des biochar fabriqués avec du bois d'eucalyptus, les valeurs faibles sont excellentes pour décompacter les sols (Cross et Sohi, 2011).

1.2.8.2. Effet sur les propriétés chimiques des sols:

L'ajout du biochar comme amendements aux sols agricoles peut présenter certains avantages potentiels sur l'amélioration des propriétés chimiques des sols. En effet, les biochars peuvent contenir des concentrations variées de substances alcalines. Cela dépendra de la dose appliquée et de la composition chimique du biochar (Glaser et al., 2002 ; Blanc, 2013).

Selon Lehmann, (2007); les propriétés du biochar varient fortement dans leur contenu minéral et leur pH, il contient des principes actifs et peut être produit à faible coût. La presque majorité des biochars produits sont alcalin avec des pH variant de 7-12, cette alcalinité observée dépend de la proportion des cendres ainsi que des groupements carboxyliques observés dans chaque type de biochar (Lehmann, 2007). En effet, dans les sols acides, augmenter le pH du sol pour neutraliser son acidité à l'aide d'amendements calciques à l'exemple de la chaux reste une opération coûteuse économiquement pour le petit agriculteur. L'alcalinité des biochars est un facteur clé qui affecte leur potentiel de chaulage. L'augmentation des cations basiques échangeables du sol, améliorant ainsi la fertilité du sol. Selon Yuan et al., (2011), chez les biochars basiques, la hausse de la proportion de cendres alcalines qui demeurent dans le biochar après pyrolyse à forte température est due aux carbonates.

L'amélioration des effets du biochar produit à partir des pailles d'arachide, le soja et le canola à 500 °C sur le pH du sol étaient plus importants que celui du biochar issu de la paille de maïs produits à la même température. À cette température, les carbonates étaient les principaux composants alcalins des biochars responsables de l'alcalinité des biochars (Xu et al., 2013).

L'application de biochars aux sols agricoles peut réduire les teneurs en métaux lourds et en pesticides présents dans le sol. Un tel comportement est dû essentiellement à la richesse en sites actifs adsorbants à la surface du biochar et que la capacité d'adsorption des métaux lourds par les biochars est liée essentiellement à leurs propriétés structurales et physiques telles que la taille et la répartition des pores de biochar (Hossain et al., 2010).

Laird et al., (2010) ; Prendergast et Saran., (2011) ont quantifié la lixiviation d'éléments nutritifs à partir de fumier de porc séché sur un sol agricole typique du « Midwest » aux Etats Unis. Les colonnes de sols contiennent 0.5 ; 10 et 20 g/kg de biochar qui ont été suivi pendant une durée de 45 semaines. Les résultats de ces essais ont montré que l'ajout des biochars réduit significativement la lixiviation de l'azote total et du phosphore total dissous de 11% et 69% respectivement.

1.2.8.3. Effet des biochars sur les propriétés biologiques des sols :

L'importance de la structure poreuse du biochar pour la rétention des microorganismes est suggérée par plusieurs études, il peut constituer un habitat approprié pour les microorganismes (bactéries, actinomycètes champignons et mycorhizes). L'importance de la structure poreuse pour la rétention des microorganismes est suggérée par plusieurs études (Lehmann et al., 2011). Les bactéries autant que les champignons seraient hypothétiquement protégés contre les compétiteurs en présence de biochar qui, par sa structure poreuse, permettrait aux microorganismes de se réfugier dans ces pores (Whitman et Lehmann, 2009 ; Zhang et al., 2018). Les biochars issus des biomasses présentant un système vasculaire, contiennent de nombreux micro et macrospores qui peuvent être utilisés par ces microorganismes comme refuges contre les prédateurs (Lehmann et al., 2011). L'adhésion peut également dépendre de la grosseur des pores de la structure poreuse du biochar. En effet, les pores doivent être plus larges que la grosseur des microorganismes afin que ceux-ci puissent se loger dans les espaces et adhérer aux surfaces. L'habilité du biochar à retenir les microorganismes varie

beaucoup selon les propriétés du biochar (largeur des pores, teneur en cendre..etc). En définitive, la capacité d'adsorber les éléments minéraux soluble, les gaz, l'eau ...etc à sa surface fait du biochar un habitat idéal pour les microorganismes qui le colonisent pour s'y développer et s'y reproduire (Levesque, 2017). En effet, le biochar influence également l'abondance microbienne en assurant une protection contre la dessiccation. En fait, l'ajout de biochar au sol augmente la capacité de rétention en eau grâce à sa surface poreuse offrant aux microorganismes une hydratation durant des périodes sèches ou à l'intérieur même de sols arides (Aller, 2016 ; Liang et al., 2006). Selon certains essais, un biochar provenant de la décomposition thermo-chimique des résidus de culture (résidus de récolte, de feuilles) à des températures inférieurs à 700°C présente des effets positifs sur l'abondance, la diversité et l'activité des communautés microbiennes (Levesque, 2017). Lehmann et al., (2011) ont démontré que la disponibilité en carbone, en éléments divers et celle de l'énergie pour les microorganismes colonisant le sol dépendra de la nature et de la force des interactions potentielle et simultanée entre les microorganismes, la matière organique du sol et les éléments existant sur les surfaces du biochar. Durenkamp et al., (2010); affirment que le développement de la biomasse microbienne dépendrait de la source et nature de carbone noir, de la concentration du milieu et sur le type de sol ; une augmentation de 25% de la diversité microbienne a été enregistrée dans la *Terra Preta*, sol noir de l'Amazonie enrichi en charbon.

Le biochar de bois a été ajouté à un champ agricole à raison de 0, 25 et 50 t/ha. Le biochar a augmenté la respiration du sol, le taux de croissance et le renouvellement des champignons et des bactéries après 3 ans sur le terrain, l'alcalinité associée au biochar a été entièrement neutralisée et le biochar a perdu la plupart de ses cations (K, Na, Ca). ce qui souligne la nécessité de procéder à des essais sur le terrain à long terme pour aider à informer les décisions de gestion agronomique impliquant le biochar (Jones et al., 2012).

Généralement, les bactéries et les champignons répondent différemment à un changement de pH dans le sol, la biomasse microbienne augmente avec une hausse du pH de 3,7 à 8,3 (Novak et al., 2012). En effet, les bactéries répondent positivement à une hausse du pH au-delà de 7 tandis que les champignons ne montrent aucun changement significatif dans leur biomasse totale (Steinbeiss et al., 2009).

Des travaux de recherches ont montré certaines évidences que le biochar aurait un effet bénéfiques sur la croissance des mycorhizes, un champignon du sol qui vit en symbiose existant au niveau des racines. Brussaard et al., (2007), ont prouvé que la diversité microbienne du sol confère la protection contre les maladies transmises par le sol, qui reste lié à la culture et le type de sol. Ils suggèrent que la diversité mycorhizienne contribue positivement à l'efficacité de l'utilisation des nutriments et éventuellement l'eau (Selmi, 2016).

Aussi, Matsubara et al., (2002), ont montré que l'ajout de biochar issu de la pyrolyse de coque de noix de coco a fait augmenter l'activité et la colonisation des champignons mycorhiziens arbusculaires, ce qui a conduit à protéger les racines de leurs plantes hôtes contre les infections transmises par des organismes pathogènes.

Par ailleurs, d'autres hypothèses ont montré que la libération de produits toxiques absorbés ou déjà existants dans le biochar pourrait être nuisible et jouer un rôle important sur l'inhibition de l'abondance et le développement de certains microorganismes du sol (Lehmann et al., 2011)

Ces phénomènes sont encore peu compris et parfois contradictoires compte tenu de leur complexité et actuellement, il y a très peu d'études qui se sont intéressées aux interactions simultanées entre le biochar, le sol et les microorganismes et la plante.

1.2.8.4. Effet des biochars sur la capacité d'échange cationique du sol :

La capacité d'échange cationique (CEC) donne une indication sur la fertilité chimique du sol, elle représente la capacité du sol à retenir les cations du sol. Elle correspond au nombre de cations pouvant être adsorbés par le sol, disponibles pour la nutrition des plantes. Elle est dépendante des teneurs en argile et en matière organique (Claver, 2003).

La kaolinite, argile prédominante dans les sols d'Amazonie centrale, a une faible CEC, de 1 à 10 cmol/kg. De plus, avec les conditions climatiques de ces régions favorisant la minéralisation de la matière organique, les sols d'Amazonie ont des taux très faibles en MO. Ceci explique que ces sols ont une faible CEC. Alors que les *Terra preta*, riches en MO, donnent une CEC mesurée à l'acétate d'ammonium (pH = 7) de 13 à 25 cmol/kg (Glaser et al., 2002).

D'après Steiner, 2010), le biochar provoquerait dans les sols un accroissement de la CEC mais le mécanisme n'est pas connu. Les sols de *Terra Preta* ont un CEC élevé et stable, mais rien ne prouve que l'on puisse obtenir le même résultat par adjonction de biochar dans d'autres sols.

Les valeurs de la CEC sont variables par le matériau d'origine et de la méthode de mesure utilisée. D'autre affirment que la CEC du biochar est plus dépendante de la biomasse utilisée plutôt que de la température de la pyrolyse (Zhang et al., 2010).

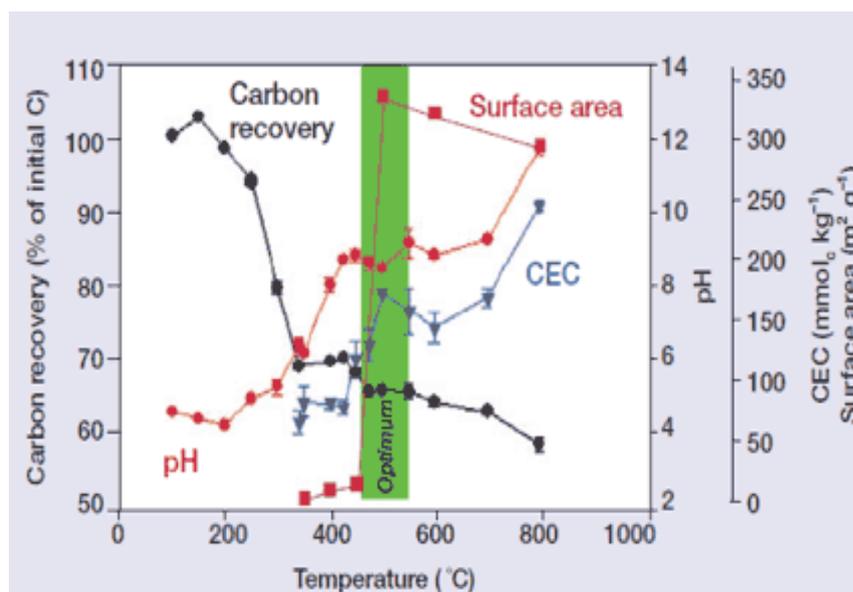


Fig n°20 : Evolution du carbone, CEC et le pH en fonction de la température de pyrolyse (Lehmann et al., 2007).

Le pH des biochars augmentait avec l'augmentation des températures de pyrolyse. La diffraction aux rayons X suggéraient que les carbonates étaient les principaux composants responsables de l'élévation du pH. Aussi le -COO (-COOH) et le (-OH) contenus par les biochars ont largement contribué à l'alcalinité des échantillons testés. Ces groupes fonctionnels étaient responsables des charges négatives de la biochar (Yuan et al., 2011).

L'application du biochar a entraîné une augmentation significative des cations échangeables (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) et de la CEC au sol. Le biochar libère ces ions dans la solution du sol par un mécanisme d'échange d'ions. Jones et al., (2012) ont constaté que lorsque la matière volatile est retirée du biochar, le reste de la biomasse du biochar contient une quantité suffisante de Ca^{+2} , Mg^{+2} et d'autres ions inorganiques contenu dans les cendres. Les sols de terra preta, ont des teneurs en Ca^{+2} , Mg^{+2} plus élevées que les sols adjacents. La présence d'ions Ca^{+2} , Mg^{+2} dans les cendres du biochar à des niveaux suffisants pour faire du biochar un agent de chaulage. Le biochar possède une surface de contact élevée, une grande porosité et une matière organique (avec sa charge négative) qui a le potentiel d'augmenter la CEC du sol lorsqu'elle est ajoutée au sol (Glasser et al., 2002). Les plantes cultivées dans des sols traités au biochar réagissent mieux à la croissance suite à l'augmentation de la CEC du sol et la rétention des éléments nutritifs (Sharma et Rajwar, 2016).

1.2.8.5. Effet des biochars sur la rétention des nutriments :

Le flux des nutriments dans le sol dépend de la vitesse de décomposition de la matière organique. Cette dernière est considérée comme une source et un puits de nutriments dans le sol, elle assure la cimentation et l'encapsulation autour des particules d'argiles en renforçant ainsi sa stabilité du sol. Les nutriments organiques sont retenus grâce à l'amélioration de la capacité d'échange de cations avec ajout de biochar (Glaser et al., 2002) ; indiquent que ce processus peut se produire dans l'ordre des mois. Des augmentations de la capacité d'échange cationique de l'ordre de 40-50 mmolc/kg dans des sites modérément dégradés. Le taux d'oxydation du biochar dépend davantage de la température annuelle plutôt que la durée dans le sol. Afin d'améliorer la capacité d'échange cationique dans les milieux arides et semi-arides, l'application du biochar apparaît comme un outil important pour améliorer la rétention dans ce types de sols fortement perturbés (Steiner et al., 2007).

L'application du biochar de différentes origines peut augmenter la disponibilité de l'azote pour les cultures. La CEC importante des sols en présence de biochar expliquerait également l'adsorption plus élevée de NH_4^+ (Liang et al., 2006; Chan et al., 2008).

La rétention de l'azote par le biochar va réduire son lessivage et va augmenter sa biodisponibilité dans les sols qui pourra potentiellement diminuer la demande accrue en fertilisants azotés pour la croissance des cultures (Blanc, 2013; Oladelea, et al., 2019).

Il a été suggéré que le biochar pourrait avoir le potentiel de réduire le lessivage de certains éléments contenus dans les sols agricoles (Lehmann et al., 2006). Cette possibilité est due à la forte affinité du biochar pour l'adsorption de nutriments solubles tels que l'ammonium (Lehmann et al., 2003), le nitrate, le phosphate et d'autres solutés ioniques (Woolf, 2008). En effet, l'application conjointe du biochar avec les engrais azotés (inorganiques) chez le riz s'est révélée être une solution durable et

écologique pour la protection de l'environnement; ce mélange a eu le potentiel d'améliorer la croissance du riz pluvial tout en réduisant le lessivage du NO_3^- au niveau d'un alfisol. La disponibilité des éléments nutritifs et la productivité est liées à la combinaison des applications de biochar avec les engrais azotés (Oladele et al., 2019).

Les pertes liées au lessivage des nutriments réduit grandement la fertilité du sol, augmente les coûts liés à la fertilisation, réduit le rendement et menace la santé de l'environnement. 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, de telles pertes engendrent des coûts économiques et environnementaux considérables, en particulier les coûts liés aux apports en fertilisants utilisés dans le but de répondre aux besoins des cultures et les pertes au niveau des nappes phréatiques aboutissant ainsi à leurs pollutions (Steiner, 2010).

Quatre taux de biochar (0, 0.5, 1 et 1,5%), deux doses de composts (0 et 30%) et deux taux d'application d'engrais (75 et 100%) ont été appliqués pour évaluer la croissance des plantules de palmier à huile au stade de la pépinière. Le biochar, le compost et le mélange biochar compost ont amélioré les propriétés chimiques du milieu, en effet le pH, l'azote, le carbone total, la CEC, Mg et Ca ont significativement augmenté. Ainsi la mesure de la lixiviation des nutriments indique que le biochar a réduit de manière significative la lixiviation de l'ammonium jusqu'à 21-46% et a amélioré le développement racinaire des plantules de palmier à huile (Rovica, 2018).

Selon Lehmann et al., (2003); Chan et al., (2008); Steiner et al., (2010), le biochar diminue les pertes d'azote dans le sol par lessivage, il est donc propice à une meilleure fertilité du sol et à une réduction des impacts environnementaux (pollution des nappes); aussi Laird et al., (2010) ; Zheng, (2013) ont noté une réduction significative de 30% des pertes de NO_3^- par lessivage dans les sols amendés en biochar d'où une meilleure disponibilité de l'azote, ceci pourrait s'expliquer par l'adsorption des ions sur le biochar suite aux diverses interactions électrostatiques et non-électrostatiques, les retenant ainsi par capillarité dans la solution des micropores .

Trois types de biochar, à savoir le biochar d'aiguilles de pin, le biochar de volaille et le biochar de bagasse, pyrolysés à 500°C utilisés seul et en mélange et un autre à l'urée. Ainsi comme témoin, l'étude indique que le biochar peut être utilisé comme régénérateur des sols acides, il est plus stable que le compost et a une plus grande capacité à retenir les nutriments. L'urée, a également amélioré les propriétés chimiques du sol, mais il ne remplit pas l'objectif de la séquestration du carbone (Sharma et Rajwar, 2016).

La CEC du biochar est plus dépendante de la biomasse utilisée plutôt que la température de pyrolyse. L'oxydation initiale rapide en surface du biochar frais est due à des processus abiotiques plutôt que des processus biotiques. Les surfaces chargées négativement augmentent la capacité d'échange de cations qui contribue à améliorer la fertilité des sols (Rahman et al., 2020).

Le phosphore et le potassium disponible augmentent de manière significative et sont plus élevés avec les traitements aux biochar de volaille. Le biochar augmente le phosphore disponible dans les sols

acide car le biochar augmente le pH du sol, ce qui rend le phosphore immobile disponible (Houben et al., 2014).

D'autres études ont présenté plus spécifiquement des réductions significatives du lessivage d'engrais azoté à partir de biochar issu de résidus secondaires forestiers (Lehmann et al., 2006) et des réductions de lessivage de l'azote et du phosphore de l'ordre de 11 % et 69 %, respectivement (Laird et al., 2010). De plus, le biochar peut, par ses propriétés physiques, séquestrer les minéraux à sa surface poreuse (Major et al., 2012). Les concentrations d'azote, de phosphore et de potassium retenues à la surface du biochar ont été plus élevées pour un biochar ayant subi une pyrolyse à une température de 300°C comparativement à un bois frais séché à faible température (20°C). Les propriétés chimiques complexes du biochar permettent aussi une adsorption des éléments minéraux à sa surface entre autres par des interactions covalentes entre les éléments (Lehmann et al., 2003). D'autre part, la faible masse volumique apparente du biochar modifie celle du sol dans lequel il est amendé et peut contribuer à améliorer la porosité et l'agrégation du sol permettant ainsi une meilleure rétention des éléments minéraux et ainsi contribuer à améliorer la qualité des propriétés physiques et chimiques du sol (Glaser et al., 2002 ; Lehmann et al., 2006).

Lehmann et al (2011) ; pense qu'il existe une co-localisation des nutriments et des microorganismes à la surface du biochar. Ceci permettrait une meilleure efficacité de microorganismes dans l'utilisation du carbone organique. Tel que mentionné précédemment, le biochar influence le lessivage des nutriments par divers mécanismes. Notamment, en augmentant la rétention en eau dans la zone racinaire, en adsorbant les minéraux directement à sa surface ou par l'interaction avec d'autres constituants du sol et même en facilitant le mouvement des éléments nutritifs adsorbés lorsque les fines particules de biochar sont transportées par percolation. Somme toute, l'utilisation du biochar est propice à une augmentation de la fertilité du sol et de la productivité de la culture via la réduction du lessivage des nutriments et via un meilleur approvisionnement de la plante en éléments nutritifs (Zang et al., 2020).

Il s'avère donc important de développer les technologies offertes pour maintenir les éléments nutritifs dans le sol. Divers paramètres influencent le lessivage des nutriments dans le sol dont le type et le taux d'argiles, la présence de matière organique ainsi que les taux en 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 des petits pores présentera une meilleure rétention en éléments nutritifs (Lehmann et al., 2003). De plus, les cycles biogéochimiques des divers éléments nutritifs du sol comme la fixation, précipitation, immobilisation et minéralisation qui sont fortement impliqués dans le taux en ces éléments nutritifs ainsi que les microorganismes qui y participent. 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. En effet, l'une des qualités les plus attrayantes du biochar est sans doute son pouvoir de retenir les nutriments et donc d'augmenter la fertilité des sols, offrant ainsi une meilleure disponibilité des nutriments à la plante. Les données actuelles indiquent et confirment que l'amendement en biochar favorisant également une meilleure consommation des éléments nutritifs par les plantes et une réduction des pertes par lessivage (Xu et al., 2013).

DeLuca et al., (2009), ont rapporté, cependant, qu'à court terme, le biochar peut occasionner une immobilisation de l'azote dans le sol. Ceci peut s'expliquer par le fait que la composition du biochar pauvre en azote et riche en composés carbonés peut induire une immobilisation de l'azote dans le sol.

1.2.9. Impacts des biochars sur le rendement et la croissance des cultures:

Les multiples carences en éléments nutritifs liées à une grave diminution de la fertilité des sols sont apparues comme la principale contrainte à la durabilité de l'agriculture à l'échelle mondiale. Bien que l'application des combinaisons biochar-fumier, biochar-compost ou biochar avec les fertilisants inorganiques s'est avéré plus généralement efficace pour améliorer les propriétés du sol et le rendement des cultures (grandes cultures et cultures horticoles) que le biochar seul, avec les propriétés souhaitées du sol, qui pourrait être une alternative réalisable pour améliorer les sols dégradés ainsi que leur potentiel de productivité à long terme. Nous suggérons en outre qu'une plus grande collaboration entre les chercheurs, les producteurs de biochar et les décideurs politiques est nécessaire pour faire progresser la recherche et l'adoption de cette importante technologie à l'échelle mondiale (Agegnehua et al., 2017).

L'effet de l'ajout de biochar sur la croissance des plantes a été intensivement étudié cette dernière décennie. Ces études couvrent une large gamme de paramètres et de variables tels que : le type de biochar utilisé (matière première et conditions de pyrolyse), la dose rajoutée, le type de sol agricole, le climat, l'échelle des expérimentations (laboratoire, terrain) ainsi que l'espèce de la plante. Selon Chan et al., (2007), il n'y a pas d'optimum dans le taux d'application de biochar aux champs. En effet, les propriétés de chaque biochar sont variables et les exigences de chaque espèce de cultures est différente de l'autre. L'idéal serait d'établir un taux pour chaque type de sol et pour chaque espèce végétale. Néanmoins, si le biochar se comporte comme du carbone organique, selon Blanc, (2013), au maximum 10 % de la teneur en argile du sol peut se complexer au biochar. Cette notion est importante pour comprendre les différentes expériences. La majorité de ces essais ont montré globalement un effet bénéfique sur la croissance des plantes et les rendements en cultures.

Graberal (2010), a étudié l'apport de biochars préparés à partir de bois de citronnier (1%, 3% et 5%) sur la croissance de la tomate et du poivron. Ils ont montré que la croissance de ces deux espèces a été significativement stimulée par rapport au témoin. La croissance et l'augmentation du rendement de ces deux cultures avec l'apport de biochar sont dues essentiellement à l'optimisation de la disponibilité des éléments nutritifs durant leurs développements.

Selon Lehman et al., (2006), le biochar est durablement séquestré dans le sol, mis à part une légère perte estimée à 5%, il demeure dans le sol avec son carbone de 500 à 10000 ans selon les estimations. Alors que lorsqu'une matière organique ordinaire est incorporer dans le sol, elle se décompose facilement et une grande partie de son carbone se dégage rapidement dans l'atmosphère; par exemple, Il ne faut pas plus de cinq ans pour que 80 à 90% de la paille enfouis dans

le sol soit volatiliser. Le nombre élevé de micro-organismes qui s'attaquent à la paille, très peu d'entre eux goûtent au biochar à cause de sa récalcitrance. Bref, une même quantité de paille séquestre entre 100 et 1000 fois plus longtemps son carbone si elle est mise dans le sol sous forme de biochar que si elle y est enfouie sans traitement particulier (à l'état naturel), Il est estimé que le sol *Terra Preta* contient 250t/ha.

Les résultats obtenus sur des sols semi-arides en Australie ont montré une réponse positive du biochar en combinaison avec des engrais inorganiques. Les rendements de maïs et d'arachide ont été améliorés là où le biochar d'écorce de bois était appliqué en combinaison avec un engrais azoté dans un essai en plein champ.

Une autre étude sur l'arachide a montré une fixation biologique de l'azote plus élevée avec le biochar en raison de la solubilisation et la disponibilité des nutriments au niveau du sol (Sohi et al., 2010 ; Sohi et al., 2012).

Selon Steiner et al. (2007), un essai mené sur le riz et le sorgho (*Sorghum bicolor* L), le Biochar appliqué avec des engrais chimiques (NPK) a doublé les rendements en grains de ces deux cultures par rapport à l'engrais chimique seul. Une augmentation du rendement du maïs en raison de la hausse de la disponibilité Phosphore et l'adoption dans le cadre de l'application combinée du biochar et de l'inoculation de spores fongiques du mycorhize à arbuscules (MA). Une dose de 15 % de biochar, les composantes du rendement ont significativement augmenté chez le tournesol (Semidaa et al., 2019).

Dans un autre assai avec et sans fertilisation minérale NPK, un doublement du rendement du maïs avec la combinaison d'engrais NPK et le biochar de bois par rapport à l'utilisation de l'engrais NPK seul. Le rendement été sensiblement plus faible avec les parcelles recevant du biochar seul par rapport à celles qui n'ont reçu que des engrais minéraux. Ce qui nous laisse conclure que la combinaison de ces deux fumures a donc bien augmenté la fertilité du sol. Dans cet essai; le biochar ne fournit pas les éléments nutritifs, il complète très bien l'action des autres fumures inorganiques NPK en fixant leurs nutriments pour enfin les rendre plus durablement accessibles à la plante (Sohi et al., 2010).

Le biochar a été principalement utilisé pour atténuer le stress salin. L'essai a été réalisé dans des conditions de culture en pot, sur deux variétés de riz: Jinyuan 85 et *Nipponbare* avec trois traitements 0, 1 et 3 g de NaCl/kg. La variété *Nipponbare* étaient plus sévèrement inhibés par le stress salin que Jinyuan 85, les effets régulateurs du biochar ont été plus favorables pour la performance de Jinyuan 85 que pour celle de *Nipponbare*. Selon ces auteurs, la température élevée de la pyrolyse a favorisé la formation de microstructures au sein du biochar, qui ont clairement diminué les teneurs en Na⁺ et Cl⁻ échangeables dans le sol. Le Biochar produit à 600°C était bénéfique pour l'amélioration des conditions sols dans cet essai, de ce fait il pourrait être utile en tant que mesure visant à développer le sol salin des rizières et à améliorer la productivité du riz sous le stress du sel (Zhanga, 2019).

Dans un autre assai sur terrain et sur un sol calcaire, des niveaux d'application de biochar de paille et balle de riz et blé avec différents niveaux de potassium ont été testés sur la croissance et le rendement du coton au Pakistan. Les traitements sont :

Facteur A : niveaux d'application du biochar

Contrôle sans biochar,

- i) Biochar de la balle de riz (RHB),
- ii) Biochar de la paille de blé (WSB),
- iii) Biochar de paille de riz (RSB).

Facteur B : niveaux d'application du potassium

- i) Contrôle (0 kg/ha) de K,
- ii) K à 15 kg/ha,
- iii) K à 30 kg/ha.

Les résultats ont montré que la croissance et le rendement global du coton étaient sensiblement améliorés avec les taux d'application de potassium. Les doses (15, et 30 kg/ha) en combinaison avec les trois biochar ont significativement amélioré les propriétés du sol, qui ont conduit à une augmentation très significative de la croissance et des paramètres du rendement du coton et de sa qualité suite à une meilleure disponibilité des éléments nutritifs conféré par les trois biochars. Le biochar des balles de riz a augmenté la hauteur de la plante (11,71% à 22,47%), le nombre de bulles (0,74 % à 13,75 %), et le poids moyen des capsules (35,44 % à 36,22 %) par rapport au traitement de contrôle (0 biochar). le biochar de paille riz appliqué en combinaison avec un taux de 30 kg/ha de potassium , a augmenté le rendement du coton de 14,48 % par rapport au contrôle et enfin le biochar de paille de blé a permis d'améliorer la longueur des agrafes et le micronaire de 4,32% et 24,5% respectivement sans l'application de potassium (Qayyum et al., 2020).

Cultiver des plantes médicinales en maintenant un environnement durable avec de faibles apports chimiques reste une priorité. Un essai en pot en intégrant le biochar préparé à partir de la citronnelle (*Cymbopogon flexuosus*) avec et sans engrais chimiques (60:20:40 kg/ha de NPK) avec des proportions différentes. Afin de voir leur influence sur le rendement, la physiologie et la qualité de l'herbe *Andrographis paniculata* (kalmegh) ainsi que sur les propriétés du sol.

Tous les paramètres de rendement ont été influencés de manière significative avec le traitement biochar mélangé à la CF. L'application de biochar de la citronnelle (*Cymbopogon flexuosus*), a permis d'améliorer remarquablement la teneur en carbone du sol, la capacité d'échange cationique suite à l'accessibilité des nutriments. Toutefois, un rendement nettement plus élevé en herbe fraîche (140,8 g/plante) a été enregistré dans le traitement recevant du biochar (5 t/ha) combiné à la dose recommandée de CF (60:20:40 kg/ha de NPK). Les résultats indiquent que l'utilisation du biochar seul n'a pas suffi à améliorer la croissance des plantes. Par conséquent, pour parvenir à une production d'herbes de qualité et sans danger pour l'environnement, il est recommandé d'utiliser combinaison de biochar et de FC qui non seulement améliore le rendement et la qualité de cette culture, mais aussi la qualité du sol (Karar, et al., 2013).

La teneur en carbone organique du sol a été augmentée dans les traitements du biochar seul et celui en combinaison de BC+CF. Cependant, un taux de SOC maximal a été trouvé dans le traitement recevant CF+BC et elle était supérieure de près de 65 % à celle du contrôle. Cette étude indique que

le biochar peut manipuler efficacement l'application d'engrais chimiques tout en améliorant le rendement et la qualité des plantes médicinales ainsi que des sols propriétés (Sahaa et al., 2019).

La présente étude vérifie l'efficacité de la co-application de Trichoderma, un champignon qui empêche le développement d'autres champignons pathogènes (fusarium), il est utilisé comme fongicide dans la lutte biologique (effet antagoniste). Un essai a été réalisé avec le biochar de bois sur la productivité et la qualité nutritionnelle des tomates ainsi que sur l'amélioration de la fertilité des sols. L'étude comportait cinq traitements :

- (i) Application standard de N-P-K,
- (ii) Dose de 50 % de N-P-K (contrôle),
- (iii) Trichoderma+dose de 50 % de N-P-K,
- (iv) Biochar+.50 % de dose de N-P-K et
- (v) Biochar+Trichoderma+50 % de dose de N-P-K.

L'application de Trichoderma a permis d'améliorer la croissance de la tomate et d'augmenter son rendement avec un taux de 101,45% et 11,33% pour le traitement biochar combiné avec la demi-dose de N-P-K et avec la demi-dose de NPK seul respectivement. L'application combinée de Trichoderma avec le biochar a également provoqué une augmentation des teneurs en minéraux, des solides solubles totaux ainsi que des molécules bioactives antioxydantes (l'acide ascorbique, β -carotène et lycopène), ce qui a permis d'augmenter la qualité nutritionnelle des fruits de la tomate. La co-application de Trichoderma et le biochar avec une demi-dose de N-P-K a non seulement augmenté la croissance et le rendement des plantes, mais a également permis une réduction de 50 % des besoins en engrais synthétique N-P-K. Elle a également augmenté la disponibilité des éléments nutritifs du sol et sa fertilité en augmentant la croissance fongique et bactérienne dans la rhizosphère. Cette application conjointe peut être considérée comme une stratégie durable pour la production de tomates en plein champ avec un rendement meilleur et de qualité supérieurs (Agegnehua et al., 2017 ; Sani et al., 2020).

Une culture de maïs a été menée en irrigué, un apport de biochar dérivé du bois dur à 22,4 t/ ha a été effectué sur un sol calcaire. Des engrais azotés et phosphorés ont été appliqués préalablement sur toutes les parcelles.

Les effets combinés du biochar et des engrais n'étaient pas synergiques dans ces sols calcaires. Ils suggèrent que les applications du biochar dans ces sols peuvent entraîner une réduction de la disponibilité de certains éléments comme l'azote et surtout le phosphore qui reste nécessaire pour le développement du maïs et des céréales en général afin de maintenir les objectifs des rendements.

L'étude des propriétés du sol et le rendement de l'orge avec deux variétés (Holetta et Robgebeya) sur un Nitisols ont été étudiés dans les hautes terres du centre de l'Éthiopie. Avec les traitements 10 t/ ha de biochar de bois, 10 t/ha de compost, 10 t/ha compost + Biochar et 10 t/ha et cinq niveaux d'engrais azotés N (0, 23, 46, 69 et 92 kg/ha).

L'application des engrais biologiques et les engrais azotés ont tous considérablement amélioré le rendement de l'orge, signalons que le rendement le plus élevé a été obtenu avec le traitement

compost + Biochar + engrais azotées pour les deux variétés. En effet Com + B avec l'ajout de 69 kg/ha d'azote a permis d'obtenir le rendement en grains le plus élevé (5381 kg/ha) chez la variété Holetta. Le traitement Biochar + Comp a augmenté le taux de COS et la CEC de 23-27% et 20-24% respectivement avec Holetta et 26-34% et 19-23% respectivement avec Robgebeya par rapport au témoin. En outre, Le pH du sol est passé de la valeur initiale de 5,0 à 5,6 avec Holetta et de 4,8 à 5,4 avec Robgebeya (Lentz et Ippolito, 2012).

L'étude de l'effet du potassium et le biochar de bois sur un sol jaune-brun acide a été réalisé, les doses d'engrais potassique choisies sont 0%, 20%, 40% et 100%. Les résultats ont indiqué que 2 % de biochar de bois ont remplacé 40 % d'engrais potassique classique. Selon Zhang et al.,(2020), le biochar a accéléré la conversion du K^+ lentement disponible en K^+ disponible (assimilable) en modifiant la composition de certains argiles et favorisant la croissance des bactéries de dissolution K^+ , car le biochar a considérablement augmenté l'abondance de Sphingomonas, Gaiella et Elev-16S-1332 (bactérie du sol qui dissout ou solubilise le potassium) qui a même dégradée certains polluants et inhibée les agents pathogènes).

Une autre étude a été menée sur le riz (*Oryza sativa* L.) dans le nord du Laos sur un sol à pH 7 pauvre en azote avec une dose de biochar de bois de (0-16 t/ha), associé à différents taux d'application d'engrais azotés. Les résultats ont montré que le biochar a réduit la surface foliaire et le rendement avec le biochar seul par rapport aux traitements engrais seul et le mélanges des deux, ceci est dû aux faibles taux d'azote dans sol. ce qui explique que le biochar sans application supplémentaire d'engrais azotés pourrait réduire le rendement du Riz dans un sol pauvre en azote; il est donc recommandé de combiner le biochar avec un engrais inorganique ou organique riche en azote pour un rendement meilleur (Asai et al., 2009).

Un essai sur l'influence de différentes doses (0, 0.5, 1.2 et 4 %) de biochar animal (carcasse de porc) avec le biochar de bois (*Platanus orientalis*) sur les propriétés d'un sol dégradé et contaminé par le cadmium (Cd) chez le pak choi ou le chou de Chine (*Brassica rapa* sub sp. *Chinensis*). Les résultats ont montré que les concentrations du potassium et du phosphore dans les tissus végétaux ont augmenté de 1,0 à 3,5 fois avec le biochar de bois et le biochar animal respectivement; ceci pourrait être probablement due à leur taux élevé dans ces biochars. L'augmentation de la biomasse et du rendement des plantes dans les sols traités avec les deux biochars s'explique non pas seulement par l'augmentation associée à la disponibilité en nutriments au niveau du sol mais encore par l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol comme la rétention en eau, le carbone organique et la CEC (Chen et al., 2020).

Des engrais potassique à des doses de (0, 50, 100, 150 et 200 kg/ha) et un biochar de bois avec une dose de (30 t/ha) ont été appliqués dans un essai sur le maïs. Les résultats ont montré que le biochar seul et combiné à différents niveaux d'application de potassium, a augmenté le rendement de le maïs de 19% et de 30% à 200 kg/ha respectivement et a augmenté la disponibilité de N, P, K, Ca et Na dans le sol par rapport au témoin (Astutik et al., 2017, Oladele et al ; 2019).

Les vignobles européens présentent une faible fertilité des sols due à une faible teneur en matières organiques. En Suisse, des amendements de biochar de bois seul (8 t/ha), produit à 500°C, de compost (55 t/ha) et le mélange biochar-compost (8 t/ha+ 55 t/ha) ont été apportés au sol. Après 3 années, il s'en avéré que les traitements au biochar seul n'ont induit qu'à de faibles effets sur le rendement par rapport au témoin et au mélange Schmidt et al., (2014), ont conclu que l'application de cette quantité de biochar apportée seul n'a pas de valeur économique immédiate pour la culture de la vigne dans un sol tempéré, alcalin et peu fertile.

Une autre étude sur l'effet d'un biochar produit à partir de boues d'épuration par pyrolyse à une température de 550 C° sur le sol (chromosol) a été réalisée afin d'évaluer la croissance, le rendement et la biodisponibilité des nutriments chez les tomates cerises cultivée en pot et dans des conditions contrôlée avec les traitements suivants ;

- 1-Le sol avec du biochar (10 t/ha),
- 2-Le sol avec du biochar et de l'engrais,
- 3-Le sol avec de l'engrais uniquement,
- 4-Un témoin.

En général, les résultats ont montré que l'application du biochar a amélioré la production de tomates cerises. Le rendement s'est avéré être à son maximum lorsque le biochar était appliqué en combinaison avec l'engrais avec une augmentation de 64% par rapport au contrôle, ceci a été attribué à l'augmentation de la disponibilité des nutriments phosphore, azote et oligo-éléments pour la plante (Hossain et al., 2010).

Plusieurs facteurs du processus de pyrolyse influence la qualité du biochar obtenu, d'où l'importance de caractériser le biochar avant toute application au sol et dans environnement donné. Il est aussi important que les expérimentations soient menées en milieu contrôlé et en champs avant de déterminer la dose de biochar à apporter sur tel ou tel type de sol ou culture. En général avec le biochar, plus le sol est pauvre plus le biochar aura un effet significativement positif. Les sols à texture légère (limoneux ou sablonneux) seront propices aux applications de biochar que les sols à texture lourde comme les sols argileux. Non seulement que le biochar peut enrichir les sols en y augmentant fortement et durablement le taux de carbone, mais les sols enrichis par du biochar se développent naturellement plus en profondeur (durée de vie et sa recalcitrance), par conséquent, le carbone total stocké dans ces sols peut être d'un ordre de grandeur plus élevé.

Les résultats des différents travaux de recherche à travers le monde concernant l'effet des biochars, sur les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols avec les différentes espèces cultivées sont très variables. Cette situation nécessite plus de recherches approfondies sur les mécanismes et les interactions du biochar avec le sol, les microorganismes et la plante pour ainsi pouvoir élaborer des biochars de qualité favorable à la productivité du sol et à la croissance de la plante (Haddad, 2017).

L'ajout de biochars aux sols agricoles comme amendements peut induire des modifications potentielles des propriétés physiques, chimiques et microbiologiques des sols. Les paramètres

affectés directement sont principalement la porosité, la densité apparente, la stabilité des agrégats, la capacité de rétention en eau et en nutriments, la capacité d'échange cationique (CEC). En effet les rendements de certaines cultures sur différents sols ont été estimés à environ 3 à 4 fois supérieures par rapport aux témoins. Cette fertilité a été liée surtout à la présence d'une forte proportion de carbone dans ces sols en comparaison aux sols témoins où les teneurs en matières organiques totales sont moindres (Zanutel, 2019).

Un fort récent intérêt est actuellement accordé pour le « biochar » qui pourrait être cerné en deux points comme suit :

-Sa particularité dont son aptitude qui est liée à ses propriétés chimiques et physiques spécifiques, telles qu'une haute densité en charge aboutissant en une plus grande rétention d'éléments nutritifs et sa nature de particules, associées à sa structure chimique spécifique fournissant une plus grande résistance à la dégradation microbienne que les autres matières organiques du sol. Il est pourtant important de noter que deux choses affectent spécialement la qualité des « biochars » à savoir, les matières premières d'où ils proviennent ainsi que les conditions dans lesquelles ils sont fabriqués.

-Comme déjà cité précédemment, le biochar peut être utilisé comme amendement du sol, notamment pour la correction des sols à forte acidité comme matériau de chaulage, vu son pH souvent élevé et un nombre élevé de cations basiques. Lehmann et al., (2006), ont montré que les « biochars » utilisés comme amendement semblent être généralement basiques ($\text{pH} > 7$). Par contre, les « biochars » peuvent être produits à presque n'importe quel pH (entre 4 et 12) et peuvent augmenter leur pH de 2,5 après une petite période d'incubation de 4 mois dans le sol. Selon les mêmes chercheurs, les variabilités peuvent être dues à la nature des biomasses ainsi qu'aux conditions de production des biochars.

D'une manière générale, le taux de minéralisation de l'azote est aussi bas lorsque le taux de C/N est élevé. Ainsi, des études sur l'incubation pour déterminer la périodicité de la minéralisation de l'azote, soit au champ ou soit au laboratoire doivent être requises. La stabilité du biochar dans le sol est une question fondamentale puisque que seule une longue période de résidence peut assurer une séquestration durable du carbone. La stabilité du biochar peut être expliquée par la formation d'anneaux aromatiques extrêmement récalcitrants durant la pyrolyse. Cette stabilité dans les sols est affectée par les conditions climatiques (T, H%), le type de sol et la composition du biochar (Lehmann et al., 2011).

L'application du biochar sur le sol influence diverses propriétés physico-chimiques du sol en raison de sa surface spécifique élevée; il est cependant généralement pauvre en nutriments d'où des ajouts d'amendements organiques ou inorganiques sont nécessaires (Glaser et al., 2002). Selon Steiner et al., (2010), la plupart des avantages sur la fertilité des sols ont été obtenus en des sols tropicaux très altérés mais aussi des rendements plus élevés d'environ 30% ont été obtenus sur l'ajout de biochar dans les sols tempérés surtout dégradés des régions arides du monde entier. Par conséquent, le

biochar est une option pour la séquestration à long terme du carbone, ce qui a été prouvé avec succès par le phénomène de la *terra preta* pour au moins 2000 ans (Glaser, 2002).

En outre, à long terme le compost est minéralisé plus rapidement que le biochar ou les mélanges de biochar-compost; les rendements et la fertilité des sols ont généralement augmenté avec l'amendement biochar-compost. D'après les essais déjà réalisés, cet effet est plus prononcé et apprécié dans un sol sablonneux (pauvre en nutriments) que dans un sol argileux (Fischer et Glaser, 2012).

Une étude menée par Gaskin et al. (2010), avec des biochars de coques d'arachide et de bois de pin produit à 400°C apporté à un sol sableux, a montré une baisse du pH du sol.

Dans les zones arides et sur un sol sablonneux, l'application de biochar de compost de volaille à 15 et 20 t/ha a augmenté significativement le rendement du maïs de 98 et 150 % respectivement par rapport au témoin, ceci a été attribué à la disponibilité et à l'augmentation de l'absorption des nutriments. En outre, l'efficacité d'utilisation de l'eau de la culture du maïs a augmentée d'environ 6, 91 et 139 % par rapport au contrôle, avec des applications de biochar à des niveaux de 10, 15 et 20 t/ha, respectivement (Wael et al., 2019).

Tammeorga et al., (2014) ; ont permis de mettre en évidence le potentiel du biochar pour l'assainissement des terres contaminées. En effet, le biochar a permis de réduire 10 fois la concentration en Cd dans la solution du sol et ainsi de réduire sa phytotoxicité après une période de 2 mois. Les concentrations de HAP ont également été réduites par le biochar, avec plus de 50 % de diminutions.

D'après Clements et al., (2015) ; seuls les sols sableux voyaient leur teneur en eau fortement augmenter (plus que doublé). Il n'observait aucun changement dans les sols limoneux et les sols argileux qui perdaient même un peu de leur capacité à retenir l'eau. Les sols à texture grossière seraient donc les seuls à profiter de bénéfiques hydriques offerts par le biochar (Une expérience a par exemple montré que la teneur en eau d'un sol sablonneux passait de 18% à plus de 45% suite à l'apport de charbon de bois.

Dans une autre étude réalisée sur du biochar de bois (pyrolysés à 600 C°) et appliqué à des doses de (0,5, 1, 2,5, 5 et 10 %) sur un sol sableux chez le maïs (*Zea mays* L.). Une augmentation considérable de la biomasse totale et du rendement du maïs a été enregistrée par rapport au témoin. Selon Kocsis et al., (2020) ; la dose de 1 % s'est révélée efficace sur les rendements du maïs sur un sol sableux et faiblement humifères grâce à la teneur élevée en phosphore et en potassium contenu dans certains biochars utilisés .

L'application de biochar de la citronnelle (*Cymbopogon flexuosus*), a permis d'obtenir un rendement nettement plus élevé en herbe fraîche (140,8 g/plante) dans le traitement recevant du biochar (5 t/ha) combiné à la dose recommandée de (60:20:40 kg/ha) de NPK. Les résultats indiquent que l'utilisation du biochar seul n'a pas suffi à améliorer la croissance des plantes. La teneur en carbone organique du sol a été augmentée dans les traitements du biochar seul et celui en combinaison de Biochar + NPK (Sahaa et al., 2019).

Dans une région semi-aride, un essai sur l'effet de la ferti-irrigation (goutte à goutte) sur un sol alcalin chez le concombre en présence et absence de biochar a été réalisé. Cette ferti-irrigation a été comparée à une irrigation traditionnelle (control). Les résultats ont montré que le biochar combiné à la ferti-irrigation quotidienne a augmenté le rendement du concombre de 30% par l'amélioration de la disponibilité des intrants tels que l'eau et les engrais pour la culture par rapport au contrôle (Xu et al., 2020).

L'effet synergique du biochar fabriqué à partir de résidus de rafles de maïs avec un engrais inorganiques a été étudié sur le rendement du maïs (*Zea mays* L.) sous un système d'irrigation « goutte-à-goutte ». Le biochar a été appliqué à quatre doses: 0, 3, 6, et 10 t/ha, en combinaison avec un engrais inorganique NPK 15:15:15 appliqué à deux taux : 0 et 300 kg/ha sur un sol sableux. Les parcelles ont été irriguées par le système goutte à goutte pour maintenir une humidité disponible à environ 50 %. Les résultats ont montré que les rendements de la culture et de sa biomasse augmentaient positivement avec l'augmentation de la quantité de biochar ajouté. L'application combinée d'engrais et de biochar ont entraîné une augmentation de 11,4 % et de 16,5 % pour les rendements en grains et en biomasse. En outre, l'analyse des propriétés chimiques du sol a montré que le biochar augmentait positivement le P, N, K et la CEC du sol. Les résultats ont établi que l'application d'engrais et de biochar augmente de manière synergique les rendements du maïs irrigué au goutte-à-goutte.

Dans une expérience en plein champs réalisée sur une durée de deux ans, deux amendements ont été apportés, un amendement avec le biochar du compost de volaille (BPC) à 12 t/ha et l'autre avec des engrais pyroligneux (PS) à 0,15 t/ha qui ont été ajoutés 1 semaine avant l'ensemencement du blé d'hiver à un sol modérément salé dans une région à climat aride en Chine centrale. Le rendement a été augmenté par rapport au témoin de 38% sous traitement BPC-PS pendant 2 ans de suite. Ce mélange a aussi sensiblement améliorée les conditions physiques et chimiques du sol et par conséquent, il pourrait être une option efficace pour atténuer le stress salin et améliorer la productivité des cultures dans les terres cultivées touchées par le sel. Le mécanisme reste inconnu et mérite des recherches plus approfondies (Siddique et al., 2013).



Fig n°21 : Les cacaoyers avec biochar à gauche avec ceux non traités à droite, *Brezil* (pro-natura@wanadoo.fr, 2016)

| Type de culture | Auteurs | Localisation | Type de sols | Quantité de biochar (t/ha) | Augmentation de rendement (%) |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Riz | Asai et al. | Houay-Khot, Nord du Laos | upland | 8 | 70% |
| Riz | Steiner et al. | Manuas, Brésil | xanthic ferralsol / laterite | 11 | 73% |
| Riz | Masulili et al. | Sungai Kakap, Indonesia | acid sulphate soil | 10 | 93% |
| Riz | Zaitun et al. | Empretring, Indonesia | - | 10 | 57% |
| Cane à sucre | Chen et al. | Okinawa, Japan | shimajiri maji (clay) | 7,2 | 78% |
| Tomate | Effah et al. | Kade, Ghana | forest ochrosol | 7 | 177% |
| Cotton | Reddy | Midjil Mandal, Andhra Pradesh, India | alkaline | 3,75 | 100% |
| Choux | Carter et al. | Siam Reap, Cambodia | sandy acidic | 100 | 750% |
| Maïs | Major et al. | Llanos Orientales, Colombia | savanna oxisol | 8 | 71% |
| Maïs | Major et al. | Llanos Orientales, Colombia | savanna oxisol | 20 | 140% |
| Maïs | Kimetu et al. | Vihiga, western Kenya | highly degraded ultisol | 6 | 71% |
| Arachide | Islami et al. | Malang, Indonesia | clay loam | 15 | 54% |
| Niébé | Tagoe et al. | Gifu, Japan | sandy loam | - | 146% |
| Manioc | Islami et al. | Malang, Indonesie | clay loam | 15 | 32% |
| Oignon | Pro-Natura | Sénégal | - | 10 | 50% |

Tab n°1 : Résumé de publications scientifiques majeures montrant les effets du biochar sur les principales cultures tropicales. (pro-natura@wanadoo.fr, 2016)

| Type de culture | Auteurs | Localisation | Type de sols | Quantité de biochar (t/ha) | Augmentation de rendement (%) |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Riz | Lugato et al. | Nord d'Italie | aguic hapludalf | 40 | 36% |
| Riz | Zhang et al. | Shenyang, Chine | loam sableux | 30 | 40% |
| Maïs | Uzoma et al. | Tottori, Japon | sol sableux | 15 | 150% |
| Maïs | Peng et al. | Yingtian, Chine | ultisol | 2,4 | 64% |
| Soja | Tagoe et al. | Gifu, Japon | - | 4 | 43% |
| Blé | Van Zwietan | NSW, Australie | ferralsol | 15 | 170% |
| Blé | Vaccari et al. | Postoia, Italy | loam limoneux | 30 | 33% |
| Colza | Pervej-Ahmed et al. | Saskatchewan, Canada | loam brun | 1 | 20% |
| Orge | Gathorne-Hardy et al. | Angleterre | sol léger | 20 | 43% |
| Choux | Jia et al. | Nanjing, Chine | fimi-orthic anthrosol | 30 | 96% |
| Radis | Chan et al. | NSW, Australie | chromosol | 10 | 42% |
| Poivron | Graber et al. | Israel | mélange sans sol | 8 | 79% |

Tab n°2 : Résumé de publications scientifiques majeures montrant les effets du biochar sur les principales cultures tempérées. (pro-natura@wanadoo.fr, 2016)

1.2.10. Les avantages environnementaux des biochars :

1.2.10.1. Aspects et avantages sanitaires :

En termes de bilan écotoxicologique, les avantages semblent l'emporter sur les inconvénients et doivent encore être précisés par les travaux de recherche. Parmi les inconvénients, il faut citer les goudrons et le monoxyde de carbone produits lors de la production du biochar; qui sont des polluants et des produits toxiques avérés cancérigènes. Mais cet aspect négatif est à mettre en balance avec le fait que le charbon de bois est réputé pouvoir contribuer à détoxifier l'eau à la différence de fumiers et fientes de volailles, le biochar ne pose a priori pas de problèmes d'introduction de germes pathogènes (type streptocoques ou staphylocoques éventuellement présents dans les fientes de volailles (fientes qui peuvent par ailleurs contenir des résidus d'antibiotiques, antiparasitaires et hormones). Ceci présente notamment un avantage pour les cultures de légumes frais ou plantes à croissance rapide et se mangeant crus (radis, carottes, salades... etc).

1.2.10.2. Assainissement des sols pollués :

Des études antérieures (Lehmann et al., 2011) ont démontré que le biochar affectent différemment les microorganismes, les plantes et les invertébrés du sol. Les effets toxiques du biochar sur les organismes peuvent être associés aux contaminants toxiques existants dans le biochar mais ils peuvent également résulter de la dose de biochar appliqué et le pH élevé. D'autre part, le biochar peut stimuler la croissance et le développement des organismes en raison de sa teneur en macro et micronutriments et de la biodisponibilité partielle du carbone contenu dans sa matrice. En outre, en raison de sa structure poreuse, le biochar peut fournir un excellent environnement pour le développement des microorganismes du sol. Ainsi, bien qu'il existe un risque de la propagation des contaminants du biochar dans le milieu environnant, l'affinité significative du biochar pour ces contaminants tend à réduire leur propagation. On peut donc présumer que non seulement les contaminants provenant du biochar ont une mobilité réduite dans le sol mais il peut également réduire la mobilité des contaminants déjà présents dans le sol. Ce phénomène est utilisé dans les techniques d'assainissement largement décrit dans la littérature. L'ajout de divers types de biochar dans le sol n'a souvent pas d'effet toxique et il a même pour résultat une série d'effets souhaités (comme l'augmentation de la biomasse végétale ou un nombre plus élevé de microorganismes dans le sol). Toutefois, ces effets sont associés au type de biochar (la matière utilisée pour sa production et la température de pyrolyse), son taux d'application et le type de sol auquel il est ajouté. Les biochars obtenus à partir des végétaux ont généralement une faible teneur en contaminants par rapport aux biochars produits, par exemple, à partir des boues d'épuration ou le fumier animal (la volaille...etc). Le biochar produit à basse température (<500°C) contient plus de nutriments biodisponibles, qui contribuent à augmenter la quantité de microorganismes dans le sol et à un meilleur rendement des cultures. Le type de sol et le choix du biochar ajouté est un facteur très important, car les propriétés physico-chimiques du biochar sont très importantes (Manzano et al., 2020).

Plusieurs techniques établies telles que les moyens l'assainissement biologique et des technologies d'assainissement combinées sont impliquées dans la restauration des sols pollués par les métaux lourds. Mais récemment, le biochar est devenu populaire utilisés comme adsorbants des métaux lourds du sol, il est considéré le meilleur pour l'assainissement des contaminations par les métaux lourds que tout autre car il contient toutes les catégories de propriétés adsorbantes comme ces grandes surfaces spécifiques, structure poreuse, sa nature alcaline et également ces différents groupes fonctionnels (COOH et OH) (Ahmad et al., 2014 ; Meena et Meena, 2017) démontré par plusieurs chercheurs (Siedt et al., 2021).

L'application de différents taux (1 %, 5 % et 10 %) de biochar a montré un effet positif sur la réduction du Ni disponible par rapport au témoin. La quantité initiale de Ni disponible dans le sol contaminé de l'industrie textile était de 61,80 ppm. Après 90 jours, la teneur en Ni du sol a été réduite à 18,20%, 25,10% et 29,94% au taux de 1 %, 5 % et 10 % d'application de biochar, respectivement. Le biochar contient certaines substances alcalines qui sont la raison du pH élevé. Ainsi, l'incorporation du biochar augmente et accélère la formation de précipitations de métaux lourds dans le sol (Yuan et al., 2011). Le biochar contient de nombreux groupes fonctionnels à sa surface, les principaux sont les groupes fonctionnels contenant de l'oxygène COOH et OH (Lee et al., 2013), ces groupes fonctionnels ainsi que les métaux lourds forment des complexes de surface, et ainsi, l'adsorption de métaux lourds augmente à la surface du biochar incorporé aux sols; Ces mécanismes augmentent l'immobilisation des métaux dans le sol et récemment, le biochar est devenu populaire utilisés comme adsorbants des métaux lourds du sol (Rahman et al., 2020).

Des biochars ont été produits à partir de trois boues d'épuration différentes à une température de 500 °C. Ces biochars ont été ajoutées au sol à un taux de 1 %. L'étude révèle que ces biochars entraînent l'accumulation des HAP qui sont des substances mutagènes et cancérigènes existants dans le sol par rapport au témoin (Agegnehua et al., 2016).

La capacité de sorption maximale démontrée par le biochar du fumier de bovins laitiers (DMBC) et le biochar de la balle de riz (RHBC) sur la base des résultats de la modélisation, les métaux sont réduits avec une sorption plus élevée observée dans la RHBC puis la DMBC (Xu et al., 2013).

Sizmura et al., (2011), ont testé l'impact du compost et du biochar, sur la mobilité et la disponibilité des métaux sur la croissance de l'herbe pour revégétaliser les sols contaminés de la Site minier de Parys Mountain, Anglesey. Lors d'une expérience en laboratoire, le sol contaminé. Les résultats ont montré que la combinaison du biochar-compost a permis de réduire le Cu soluble dans l'eau de 5,6 à 0,2 mg/kg, le Pb de 0,17 à moins de 0,007 mg/kg et de Zn de 3,3 à 0,05 mg/kg dans le sol contaminé et a augmenté le pH de 2,7 à 6,6. Le biochar a le potentiel de décontaminer des sols et de réduire la biodisponibilité des contaminants ainsi que la mobilité des PTE (éléments potentiellement toxique) dans le sol (Gomez-Eyles, 2011).

L'effet de l'application de biochar sur le devenir du cadmium, du zinc et du plomb a été étudié dans un sol non contaminé, amendé avec du biochar de bois à trois taux (1 %, 5 % et 10 %) chez *Lolium*

multiflorum L. Le taux de métaux après la première incubation a diminué de manière significative avec l'augmentation du taux d'application du biochar. En présence de 5% et 10% de biochar, ces métaux ont continué à diminuer au cours des 56 jours avec des concentrations de 2,5, 5,4 et 3,8 fois moins pour le Cd, Zn et Pb respectivement. Cet effet a été principalement attribué à l'augmentation du pH du sol et à leurs diffusions dans les micropores du biochar (Houben et al., 2013).

Sachant que les métaux lourds présents dans les sols causent des dommages importants à la santé de l'homme et à l'environnement. Dans cette optique Houben et al., (2013), ont étudié l'effet de l'application de plusieurs biochars issus de pailles de blé, de maïs, de soja, de coton et d'aubergine sur la concentration du cadmium, du zinc et du plomb dans le sol. La capacité d'adsorption du Cd a été obtenue avec le biochar à base de pailles d'aubergine (ESBC), ce qui est probablement dû à sa grande surface spécifique et au volume total des pores. 96,2 % du Cd pourrait être conservé dans la couche de sol de 10 cm de profondeur où la racine du ray-grass (*Lolium perenne* L.) peut atteindre. L'efficacité de l'élimination du Cd pourrait atteindre 22,8 % et 76,9 avec un dosage d'ESBC de 3 % tout en augmentant le rendement.

Un essai sur l'influence de différentes doses (0, 0.5, 1. 2 et 4 %) de biochar animal (carcasse de porc) avec le biochar de bois (*Platanus orientalis*) sur les propriétés du sol dégradé et contaminé par le cadmium (Cd) chez le pak choi ou le chou de Chine (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*). Les deux traitements au biochar ont atténué le risque de présence de Cd dans ces sols et ont aussi amélioré la qualité des sols. Selon Chen et al., (2020), l'augmentation de l'alcalinité pourrait être un facteur raisonnable pour immobiliser le Cd, réduisant ainsi son absorption par les plantes (Chen et al., 2019), et promouvoir la productivité des cultures après l'application de biochar sur un sol acide. L'application du biochar de porc a été plus efficace par rapport à le biochar de bois, son utilisation comme nouveau biosorbant écologique une véritable éponge qui pourrait améliorer la fertilité des sols et la qualité des cultures dans les zones dégradées contaminées par les métaux lourds à l'avenir.

Un essai a été mené pour tester lequel des amendements organiques riches en carbone contribuent mieux à la rétention des nutriments et des pesticides dans les sols agricoles pour les répercussions sur les eaux souterraines. Une comparaison entre la paille, le compost et le biochar a été réalisée. Il apparaît clairement que pour les trois amendements, c'est le biochar qui s'est montré le plus efficace dans l'absorption des pesticides et les éléments nutritifs du sol par rapport à la paille et le compost. Il reste un matériau-éponge très prometteur à utiliser grâce à son efficacité et sa durabilité dans le sol (Siedt et al., 2021).

Un biochar dérivé de résineux a été ajouté à un taux de (5 %) à deux sols miniers (S1 et S2) contaminés au Cd (4,8-74mg/kg), Pb (318-1899 mg/kg) et Zn (622-3803 mg/kg), pour évaluer ses capacités d'immobilisation de ces éléments potentiellement toxiques (PTE). L'ajout de biochar a augmenté le pH du sol, la teneur en carbone organique, le potassium, le magnésium et le calcium, par ailleurs il a réduit les réserves de Cd, Zn et Pb solubles et échangeables dans la solution du sol surtout dans le S1, où le pH était neutre. Les résultats présentés indiquent que le biochar dérivé des

résineux peut être utilisé efficacement pour limiter la propagation des PTE dans les sols contaminés (Manzano et al., 2020).

Le biochar et du compost de déchets verts ont été rajoutés à un sol contaminé en plein champs, et après 60 jours, des augmentations significatives du carbone organique et du pH ont été enregistrés suite à l'ajout du biochar, alors que les concentrations phytotoxiques en Zn et en Cd ont significativement diminué. Le biochar a été le plus efficace avec une réduction de 10 fois par rapport au compost, ces résultats mettent encore une fois en évidence le potentiel du biochar dans l'assainissement des terres agricoles contaminées (Beesley et al., 2010).

Dans une autre expérimentation, deux amendements, le compost de déchets verts et le biochar de bois ont été évalué pour leur aide à la régulation de la mobilité de cuivre et de plomb et leur assimilation par la végétation. Les amendements ont été mélangés à un sol fortement contaminé au Cu et au Pb (600 et 21 000 mg/kg) respectivement, provenant d'une ancienne mine de cuivre dans le Cheshire (Royaume-Uni). Le ray-grass (*Lolium perenne* L. var. Cadix) a été cultivé pour une durée de 4 mois. Les résultats ont montré que le biochar été le traitement le plus efficace pour réduire le taux de Cu dans l'eau la solution du sol et avec des quantités significativement réduites dans les pousses de ray-grass (Beesley et al., 2011).

L'incorporation du biochar dans le sol pourrait réduire sensiblement la biodisponibilité des pesticides connus pour leur toxicité dans les sols contaminés. Le biochar produit à une température relativement élevée (850 C) est susceptible d'être plus efficace que ceux produits à des températures très basses, principalement en raison de sa plus grande surface et à sa porosité. La pyrolyse de copeaux de bois d'Eucalyptus spp à 450 (BC450) et 850°C (BC850) ont été soigneusement mélangés dans le sol avec des taux de 0 %, 0.1 %, 0.5 % et 1 % de sol sur une culture d'oignons (*Allium cepa*. L) de printemps qui a été cultivée pendant 5 semaines dans les sols amendés au biochar dopés avec 50 mg/kg de chaque pesticide. Les deux biochars (BC450 et BC850), se sont avérés posséder des propriétés nettement différentes en termes de surface et de porosité. Le coefficient de sorption des sols amendés augmentent progressivement avec la teneur en biochar dans le sol. Le biochar BC850, dont la surface et la microporosité sont plus élevées, a montré un effet plus important et pourraient améliorer la sorption des pesticides pyriméthanile lorsqu'il est incorporé dans le sol (Yu et al., 2010).

Selon Yu et al., (2009), la diminution des deux pesticides due à la dégradation et ou la séquestration dans le sol diminuent de manière significative avec l'augmentation des quantités de biochar. D'après ces auteurs, malgré la persistance des pesticides dans les sols amendés au biochar, l'absorption de pesticides par les plantes a nettement diminué avec l'augmentation la teneur en biochar du sol. Le (BC850) était particulièrement efficace pour réduire la phytodisponibilité des deux pesticides, en raison de sa grande affinité et sa capacité à stoker les résidus de ces pesticides. Il s'avère que l'intérêt croissant du biochar pour l'amendement des sols à des fins de séquestration du carbone peut être plus renforcée en raison du rôle potentiel que le biochar peut jouer dans la réduction des résidus de pesticides dans les produits agricoles.

La capacité de sorption maximale des métaux lourds a été démontrée par le biochar du fumier de bovins (DMBC) et le biochar de la balle de riz (RHBC), sur la base des résultats de la modélisation de

Langmuir le taux de métaux sont réduits. D'autre part, une sorption plus élevée est observée dans la RHBC puis la DMBC (Xu et al., 2013).

Pour améliorer la santé des sols plusieurs techniques ont été établies dans la restauration des sols pollués par les métaux lourds. Récemment, le biochar est devenu populaire et utilisé comme adsorbant de ces métaux lourds du sol. Différentes biomasses organiques peuvent être utilisées pour préparer ces matériaux riches en carbone, qui contiennent de grandes surfaces avec différents groupes fonctionnels actifs. Actuellement, ils sont reconnus comme un outil efficace, moins coûteux et le meilleur pour l'atténuation des contaminants en métaux lourds que tout autre outil.

Ces mécanismes spécifiques au biochar impliqué dans la rétention des contaminants restent encore mal connus. A long terme, l'impact du biochar sur l'environnement et sur les organismes du sol reste prometteur, d'où la nécessité d'une meilleure maîtrise des connaissances pour une meilleure gestion de la pollution environnementale (Beesley et al., 2011)

À l'avenir, il sera nécessaire de concentrer les efforts de recherche pour déterminer les mécanismes liés à la toxicité du biochar, de réaliser un plus grand nombre de tests écotoxicologiques dans différents sols et à long terme, cela permettra d'avoir un aperçu sur les facteurs direct ou indirect impliqués dans ces processus qui seront essentiels dans les recherches et les décisions futures.

1.2.11. La production et marché du biochar :

La disponibilité et surtout le coût économique étaient les plus importants obstacles à l'utilisation du biochar, bien que des aspects pratiques (par exemple, le vent l'érosion lors de l'épandage et le risque d'inhalation par l'homme) aient également perçues comme des conséquences négatives (Jones et al., 2012).

En 2003, il a été reporté que le plus grand producteur de biochar était le Japon avec 15000 t/an (Sohi et al., 2010). En Suisse, la compostière « La Coulette », située dans le canton de Vaud, est le premier producteur de charbon végétal. Leur biochar est issu majoritairement de déchets forestiers. Leur production permet d'acheter du biochar en petite quantité jusqu'à des quantités non limitées en mètre cube. Ils vendent également un mélange compost/biochar, nommé *Terra preta*, en référence à la *terra preta d'Amazonie* très fertile mais n'étant pas identique puisque que c'est un amendement fabriqué.

Depuis le 1^{er} janvier 2012, une certification européenne sur le biochar est mise en place avec des lignes directrices pour introduire un contrôle dans la fabrication, l'usage et pour définir des qualités standards (Schmidt et al., 2014). Pour cela Il est important de noter la possibilité durant le processus de fabrication du biochar de former des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), substances très toxiques.

L'utilisation du biochar dans le sol pour une production agricole meilleure et sûre a également eu une longue histoire en Australie et une partie de l'Asie, en particulier le Japon, la Corée et la Chine. Récemment, intérêt est devenu accru dans d'autres pays asiatiques comme le Bangladesh, l'Inde et la Malaisie pour utiliser le biochar en tant qu'amendement du sol pour une productivité agricole durable pour les métaux lourds et autres polluants organiques toxiques (Clements et al., 2015)

Il est fabriqué de manière artisanale dans les pays pauvres, et des projets industriels sont annoncés dans certains pays riches. Ainsi Thenergo (groupe spécialisé dans les solutions énergétiques soutenables) a en 2007 annoncé la création, au nord des Pays-Bas, d'une unité de production de biocharbon pour une puissance de 5 MW en brûlant 75 000 t/an de biocharbon en granulé.

1.3. Le navet:

1.3.1. Historique du navet:

On affirme généralement que le navet vient du bassin méditerranéen. Toutefois, plusieurs plantes potagères appartenant à la même espèce (*Brassica rapa* L.) sont originaires de la Chine. Selon une des hypothèses présentement étudiées, il y aurait plutôt deux lignées indépendantes pour cette espèce. La première viendrait des régions plus à l'ouest (Europe, Inde et Asie centrale) et elle comprendrait le navet, le rutabaga et la navette (aujourd'hui appelée colza ou canola); la seconde, proviendrait plutôt de l'Asie de l'Est et comprendrait les nombreuses variétés de « chou chinois » cultivées pour leurs racines ou leurs feuilles.

Les Grecs et les Romains connaissaient de nombreuses variétés de navet. Au premier siècle de notre ère, Pline l'Ancien décrit, sous les noms de *rapa* et de *napus*, des navets de forme allongée, plate et ronde. À la même époque, le légume servait en France de nourriture tant pour les humains que pour les animaux d'élevage. Plus tard, il deviendra un aliment important des Anglais qui feront bouillir ou rôtir ses racines, cuiront ses feuilles et apprêteront ses jeunes tiges en salade (ITCMI, 2010).

Le navet sera introduit en Amérique par Jacques Cartier en 1541. Avec la laitue et le chou, ce sera le premier légume du vieux monde à être cultivé en Nouvelle-France. Les Amérindiens l'adopteront et se mettront rapidement à le cultiver. L'origine géographique des navets est incertaine. Ils proviendraient probablement d'Asie ou d'Europe. On trouve les navets mentionnés dans le livre XVIII de l'Histoire naturelle de Pline l'Ancien (23-79 ap. J.-C.) et Dioscoride (40-90 ap. J.-C.).

Les plus Hormis le fait que ce soit un légume hypocalorique adapté aux régimes minceur, le navet est riche en iode ce qui stimule le métabolisme. Le navet possède de nombreuses fibres qui jouent un rôle important dans le transit intestinal. Dernière vertu du navet, la présence combinée de soufre et d'arsenic lutterait efficacement contre des problèmes de peau comme l'acné. Le navet est un légume très ancien qui offre des saveurs sucrées voire un peu piquantes selon les variétés. Connue depuis la préhistoire. C'est un des légumes les plus anciennement consommés. Il a fait partie de l'alimentation de base des hommes en Europe; la pomme de terre, plus nutritive a ensuite pris le relais.

En Algérie le navet est cultivé dans toutes les régions du pays en cultures irriguées de printemps et d'été et comme culture non irriguée de fin d'automne.

1.3.2. La productions du navet :

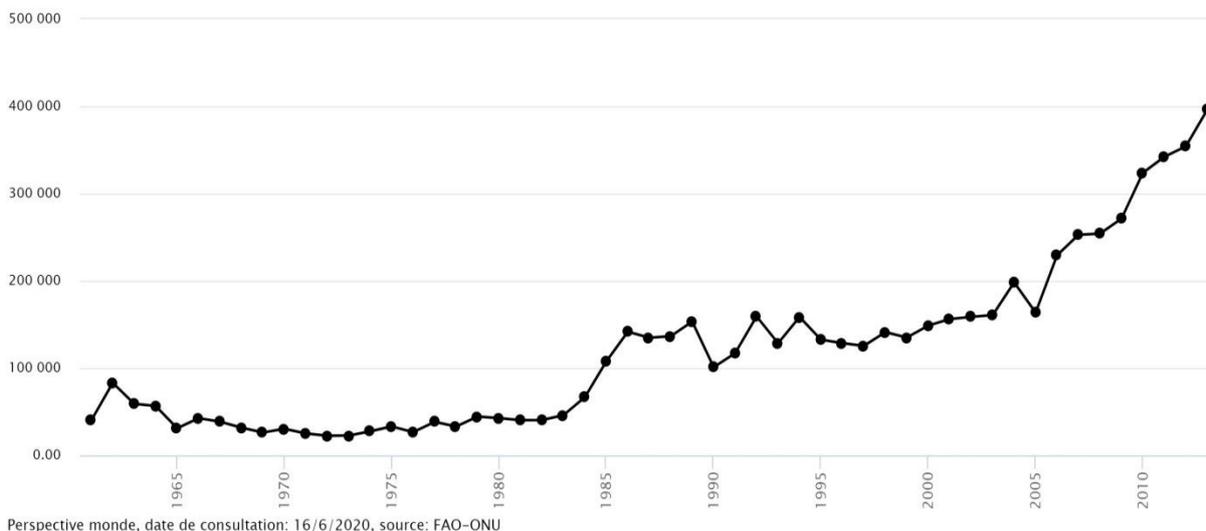
a. Dans le monde :

- Dans le monde, 42 814 538 tonnes de carottes et de navets sont produites par an.
- La Chine est le plus grand producteur de carottes et de navets au monde avec 20 574 774 tonnes de volume de production par an.
- L'Ouzbékistan arrive en deuxième position avec 2 250 559 tonnes de production annuelle. La Chine et l'Ouzbékistan produisent ensemble plus de 50% du total mondial.

b. En Algérie :

Un pic en 2013 de 396 119 t soit une augmentation de 890% en 52 ans pour l'ensemble de la période 1961-2013, on enregistre une moyenne annuelle de 119 939,43 t. Le changement enregistré entre la première et la dernière année est de 890 %. C'est en 2013 qu'on enregistre la valeur la plus élevée (396 119 t) et c'est en 1972 qu'on enregistre la valeur la plus basse (22 353 t). Nous disposons des résultats pour 53 années (FAO, 2020).

Production alimentaire: carottes et navets (tonnes), Algérie



Perspective monde, date de consultation: 16/6/2020, source: FAO-ONU

Fig n°22 : Evolution de la production des carottes et navets en fonction des années (FAO, 2020)

1.3.3. Caractéristiques du navet:

Le navet est un des légumes les plus anciens. Cette plante potagère est plus particulièrement cultivée pour sa racine très dodue, allongée ou aplatie. Elle peut être de couleur jaune, blanche, noire ou bicolore selon les variétés. Cette plante bisannuelle, cultivée en annuelle, possède des feuilles duveteuses et ovales. En cuisine, le navet peut se consommer cru ou cuit. On peut déguster les tendres racines râpées ou mélangées avec d'autres crudités. Cuites, elles accompagnent de la viande, des potées, un pot-au-feu, des soupes, des ragoûts et surtout le canard. On peut aussi se régaler avec les jeunes feuilles du navet, crues en salade ou intégrées dans un potage.

Le navet possède des propriétés médicinales, il est riche en vitamines et en sels minéraux. Il a des vertus diurétiques, laxatives, rafraîchissantes et reminéralisantes. Consommé de manière régulière, il permet de lutter contre l'eczéma et l'acné. Il est aussi pauvre en calories, donc parfait pour faire un régime (ITCMI, 2010)

Le navet (*Brassica napus*; *Brassica rapa*; *Brassica campestris*) est une plante à racines, originaire de l'Europe du Sud et appartenant à la famille botanique des Brassicacées ou Crucifères. La partie consommée est la racine charnue. Le légume est riche en calcium et en vitamine K (ACIA, 1999).

Les différents stades phénologiques du navet :

09 : Stade levée.

10 : Cotylédons étalés.

13 : 03 feuilles étalées.

43 : Racine, tiges (30 % de leur taille finale).

61 : Début de la floraison.

75 : Maturité.

1.3.4. Les exigences du navet :

1.3.4.1. Les conditions pédo-climatiques :

Dans l'ensemble des régions d'Algérie, la culture peut être conduite en irrigué et en sec pour les navets d'hiver. Le Labour 20 à 25 cm. Reprise vibroculteur herse + roulage après semis. Le navet apprécie un climat tempéré, doux et humide, il aime les expositions ensoleillées. Le navet est une plante de saison froide. L'optimum de croissance est de 27°C, mais la croissance reste bonne entre 10 et 20°C. La plante résiste au gel. Les températures élevées réduisent la qualité des racines et augmentent l'intensité de leur odeur. La culture présente une large adaptation à différents types de sols, mais préfère un sol bien drainant, non caillouteux, sans obstacles en profondeur. L'idéal serait un sol sablo-limoneux, humifère, meuble et frais. La culture tolère un léger excès de Bore, répond aux apports de Mn et de Cu. Elle ne tolère pas une forte salinité et son pH optimal du sol est de 6-6,8.

1.3.4.2. Travail de sol et semis :

Les principales variétés utilisées sont Marteau; Jaune boule d'Or; Blanc de Croissy; Blanc globe à collet vert. Les principales variétés américaines sont Royal Crown et Purple Top White Globe. La propagation est sexuée (par graine); le semis est direct en place définitive. Le nombre de graines par gramme de semence est de 240-360. Le labour doit être profond. Le nivellement du sol facilite l'obtention d'une levée homogène. Le roulage du sol permet d'avoir une bonne uniformité d'humectation des graines et de leur germination (pour les petites surfaces il suffit de Plomber les semis avec le dos d'un râteau). Le besoin en semences est de 5-6 kg/ha. L'arrangement des plantes sur le terrain est le suivant: Cuvettes de 5 lignes, écartées de 20 cm (entre rangs); 60 cm entre cuvettes; 5-8 cm entre plants dans le rang. Prévoir d'éclaircir lorsque les plants ont 2 ou 3 feuilles. La densité de plantation obtenue est de 40.000 à 60.000 pieds/ha. Le semis est généralement échelonné afin de s'accommoder avec le marché (Dominique, 2003).

1.3.4.3. Irrigation et soins culturaux :

L'aspersion est couramment utilisée pour irriguer le navet jusqu'à obtention de la levée puis l'irrigation se fait par gravité (segua), un arrosage régulier est conseillé, car les navets n'apprécient pas la sécheresse. Le goutte-à-goutte n'a pas donné satisfaction pour le navet. Les principaux soins culturaux sont: l'éclaircissage; le remplacement des manquants pour avoir une levée homogène et une bonne reprise; les binages et les buttages en phase végétative.

1.3.4.4. Fertilisation :

En apport de fond, on conseille 10-20 T/ha fumier + 70 kg N + 90 kg P₂O₅ + 120 kg K₂O/ha. En couverture: 20 kg N + 50 kg P₂O₅ + 30 kg K₂O/ha en pleine végétation; 30 kg K₂O/ha au début grossissement des racines. Une carence en bore provoque le brunissement du cœur.

1.3.4.5. Principaux ennemis de la culture et méthodes de lutte :

Les mauvaises herbes constituent un refuge aux pucerons, vecteurs des virus. Il faut donc lutter contre les mauvaises herbes, manuellement et chimiquement pour les grandes surfaces en culture. La mouche du chou et l'altise (*Phyllotreta sp*) sont les insectes les plus redoutables du navet, il faut donc traiter avec des insecticides variés afin d'éviter l'accoutumance aux produits. La pourriture des racines, l'oïdium et les viroses sont les maladies les plus difficiles à combattre; le rendement est sévèrement affecté si l'attaque a lieu au début de la saison. Il est recommandé de procéder à la lutte préventive en adoptant des méthodes culturales (rotation), biologiques (prédateurs des pucerons) et chimiques (alternance des matières actives).

1.3.4.6. Récolte et manipulation du produit :

Les navets se récoltent 2 mois après le semis dans le cas d'un semis de printemps et d'automne ; 3 mois après le semis dans le cas des variétés d'hiver. Elle se fait au fur et à mesure des ventes, il est préférable de laisser la partie aérienne verte (vente en buttes). Quelques jours après la récolte, si la vente n'a pas pu s'effectuer, on enlève les feuilles (qui ont perdu leur verdure) et on vend les racines en vrac. Le rendement moyen national est de 15-16 T/ha en moyenne; les conditions d'une bonne conservation est à basse température et à 90-95% HR durant 2 à 3 semaines.

Pour la rotation, le navet est considéré comme une plante épuisante pour le sol, il convient donc de ne pas le faire revenir au même endroit avant 3 ou 4 ans.

1.3.5. Compositions et qualité nutritionnels du navet :

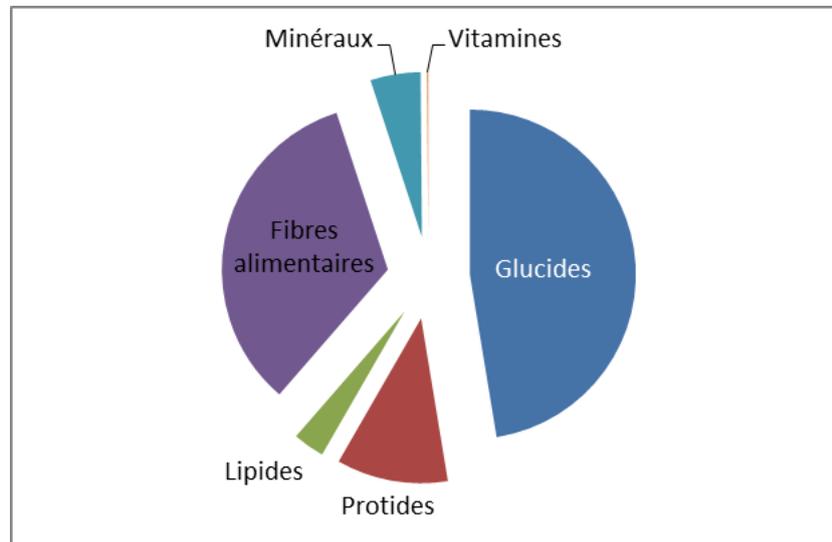


Fig n°23: Composition moyenne pour 100 g d'aliments cuits

| Composants | Quantité | Min – Max |
|-----------------------------------|------------------|------------------|
| Eau | 93 g | 88 - 94.6 g |
| Protéines | 0.945 g | 0.5 - 1.11 g |
| Lipides | 0.26 g | 0 - 0.3 g |
| Acides gras saturés | 0.005 g | 0 - 0.01 g |
| Glucides | 2.39 g | - |
| Sucre | 2.19 g | NC - 4 g |
| Fibres | 2.7 g | 1.8 - 3.49 g |
| Vitamines | Quantité. | Min – Max |
| Provitamine A Béta-carotène | 21.5 µg | 0 - 43 µg |
| Equivalent Vitamine A | 3.58 µg | 0 - 7.17 µg |
| Vitamine B1 | 0.045 mg | 0.02 - 0.05 mg |
| Vitamine B2 | 0.0305 mg | 0.01 - 0.07 mg |
| Vitamine B3 | 0.535 mg | 0.4 - 1 mg |
| Vitamine B5 | 0.2 mg | 0.19 - 0.23 mg |
| Vitamine B6 | 0.08 mg | 0.06 - 0.11 mg |
| Vitamine B9 | 14 µg | 11 - 25.3 µg |
| Vitamine C | 18.5 mg | 10 - 36 mg |
| Minéraux et oligo-éléments | Quantité. | Min – Max |
| Calcium | 38.7 mg | 16.8 - 65 mg |
| Cuivre | 0.0233 mg | 0.01 - 0.1 mg |
| Fer | 0.258 mg | 0.19 - 1.5 mg |
| Iode | 5.33 µg | 0.35 - 7.5 µg |
| Magnésium | 9.72 mg | 6.8 - 20 mg |
| Manganèse | 0.0467 mg | 0.02 - 0.25 mg |
| Phosphore | 26.4 mg | 11.7 - 50 mg |
| Potassium | 193 mg | 137 - 324 mg |
| Sélénium | 1.64 µg | 0 - 3.1 µg |
| Sodium | 33.8 mg | 4.5 - 78.5 mg |
| Zinc | 0.107 mg | 0.08 - 0.27 mg |

| Polyphénols | Quantité |
|---------------------------|-----------------|
| Lignanes | 0.15 mg |
| Polyphénols totaux | 0.15 mg |

| Valeurs nutritionnelles pour 100 g | |
|---|---------|
| Énergie (kCal) | 22 kCal |
| Protéines | 0,71 g |
| Lipides | 0,08 g |
| Glucides | 5,06 g |
| Fibres | 2 g |
| Eau | 93,6 g |

Tab n°3: La composition pour chaque nutriment pour 100 g net de navet cru

En cuisine, le navet peut se consommer cru ou cuit. On peut déguster les tendres racines râpées ou mélangées avec d'autres crudités. Cuites, elles accompagnent de la viande, des potées, un pot-au-feu, des soupes, des ragoûts et surtout la volaille. On peut aussi se régaler avec les jeunes feuilles du navet, crues en salade ou intégrées dans un potage.

Chapitre2

Matériels

&

Méthodes

2. Matériels et méthodes:

Au niveau du « Chapitre II » l'essai mené sur le sol à texture limoneuse-argileuse devrait être normalement réalisé en plein champs sur deux années (2015/2016 et 2016/2017), une programmation pour l'installation « du grand projet des serres » au niveau de la station expérimentale de l'ENSA a été envisagée au cours de la deuxième année; et afin de continuer le travail, un essai en pots a été réalisé suite au premier essai réalisé en plein champs et cela afin de comparer les résultats obtenus sur l'effet du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet.

| Année | Températures air (c°) | | | Températures sol (c°) | | | Humidité relative (%) | | | Pluie mm |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Min | Max | Moy | 30.0 | 60.0 | 100.0 | Min | Max | Moy | |
| 2015 | | | | | | | | | | |
| Janvier | 5,1 | 13,7 | 9,4 | 12,2 | 14 | 16,8 | 84,6 | 92,7 | 88,6 | 98,9 |
| Février | 4,6 | 14,5 | 9,5 | 10,7 | 12,5 | 14,4 | 71,8 | 91,4 | 81,6 | 80 |
| Mars | 10,3 | 19,3 | 14,8 | 15,3 | 15,8 | 17,5 | 68,8 | 91,7 | 80,2 | 96,3 |
| Avril | 12,8 | 22,2 | 17,7 | 25,3 | 20,3 | 21,4 | 71,6 | 89,4 | 80,5 | 0 |
| Mai | 13,2 | 24,1 | 18,8 | 21,6 | 22,7 | 22,9 | 65,9 | 89,1 | 77,5 | 28,4 |
| Juin | 17,6 | 27,3 | 22,4 | 26,1 | 26,2 | 26 | 59,1 | 86,2 | 72,6 | 2,6 |
| Juillet | 27,7 | 36,1 | 31,9 | 29,7 | 30,6 | 29,8 | 38,4 | 63,5 | 51 | 0 |
| Aout | 33,2 | 43,7 | 38,4 | 31,7 | 32,5 | 31,3 | 37 | 62,7 | 49,8 | 0 |
| Moy | 15.6 | 25.1 | 20.4 | 21.6 | 21.8 | 22.5 | 62.2 | 83.3 | 72.7 | 38.3 |

| Année | Températures air (c°) | | | Températures sol (c°) | | | Humidité relative (%) | | | Pluie mm |
|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Min | Max | Moy | 30.0 | 60.0 | 100.0 | Min | Max | Moy | |
| 2016 | | | | | | | | | | |
| Janvier | 5.8 | 15.5 | 10.7 | 12.3 | 13.7 | 16.6 | 75.1 | 96.1 | 85.6 | 56.5 |
| Février | 7.8 | 16.0 | 11.9 | 13.0 | 14.4 | 17.1 | 73.4 | 97.5 | 85.5 | 103.8 |
| Mars | 9.4 | 18.0 | 13.7 | 14.7 | 16.4 | 18.2 | 71.9 | 94.2 | 83.1 | 81.3 |
| Avril | 13.2 | 22.0 | 17.6 | 19.2 | 19.9 | 21.0 | 66.7 | 92.2 | 79.5 | 25 |
| Mai | 14.0 | 25.0 | 19.5 | 21.9 | 22.6 | 23.5 | 49.7 | 86.9 | 68.3 | 0 |
| Juin | 23.3 | 33.0 | 28.2 | 26.1 | 26.3 | 26.0 | 45.9 | 74.4 | 60.2 | 0 |
| Juillet | 25.4 | 34.3 | 29.9 | 30.3 | 30.2 | 29.7 | 45.1 | 70.5 | 57.8 | 0 |
| Aout | 24.3 | 33.5 | 28.9 | 32.0 | 33.5 | 31.4 | 53.4 | 78.1 | 65.8 | 0 |
| Moy | 15.4 | 24.7 | 20.1 | 21.2 | 22.1 | 22.9 | 60.2 | 86.2 | 73.2 | 33.3 |

Tab n° 4: Les moyennes des températures et des quantités de pluies

2.1. Essai en plein champs:

2.1.1. Description du site en plein champs:

L'expérience a été menée sur le terrain à la station expérimentale de L'ENSA (école nationale supérieure agronomique) d'El Harrach qui est situé dans le Nord est d'Alger, située entre latitude : 36°43' Nord longitude : 30°8' Est altitude : 50 m étage bioclimatique : sub-humide à hiver doux. Le précédent cultural été une culture de fève (*Vicia faba major* L).



Fig n°24 : La sciure de bois avant et après la pyrolyse

| Propriétés | Valeurs |
|--|-------------------|
| pH | 7.1 |
| N Total (NH ₄ ⁺ ppm) | 0.87 |
| CaCO ₃ (%) | 1.03 |
| K ⁺ (Meq/ 100g sol) | 0.45 |
| P(ppm) | 5.98 |
| CEC (cmol/kg sol) | 4.19 |
| C% | 0.37 |
| MO (%) | 0.63 |
| N assimilable (ppm) | 12.05 |
| CE 10 ⁻³ ms/ cm | 123.44 |
| Sable (%) | 17.12 |
| Limon (%) | 54.55 |
| Argile (%) | 28.23 |
| Texture | Limoneux argileux |

Tab n°5 : Propriétés physico-chimiques du site expérimental avant l'essai

| Propriétés | Biochar | Fumier |
|---|---------|--------|
| pH | 8.29 | 4.4 |
| N Total (NH ₄ ⁺ ppm) | 0.28 | 0.61 |
| C Pendéral (%) | 93.5 | 23 |
| K ⁺ (meq 100g ⁻¹ sol) | 0.51 | 0.81 |
| P (ppm) | 2.01 | 40.79 |
| CEC (cmol/kg sol) | 3.3 | 5.28 |

Tab n°6 : Compositions chimiques du biochar de bois et du fumier de bovin

Notre expérimentation a consisté à l'étude comme suit :

Selon plusieurs travaux déjà réalisés (Chan et al. 2008; Tammeorga et al., 2014 et Liu et al., 2012), les doses de Biochar choisies sont :

1-Le biochar de bois avec les doses suivantes : 5t/ha, 10t/ha et 20 t/ha

2-Le fumier de bovin avec une dose de 10t/ha

3-Témoin

Les huit traitements ont été organisés de façon aléatoire avec un dispositif en randomisation totale avec cinq blocs (répétitions). Chaque bloc composé de 8 parcelles de 1 x 1 m chacune. Les blocs étaient espacés d'un mètre et les parcelles étaient distantes de 0,5 m.

Les différentes combinaisons sont les suivantes :

T1 : B5

T2 : BF5

T3 : B10

T4 : BF10

T5 : B20

T6 : BF20

T7 : F

T8 : Témoin

| | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------------|
| B5 | B10 | B20 | F | BF20 | BF10 | T | BF5 | BI1 |
| B20 | BF10 | F | B5 | T | BF5 | B10 | BF20 | BI2 |
| BF20 | B20 | BF5 | T | B5 | F | BF10 | B10 | BI3 |
| T | B5 | BF10 | B10 | F | BF20 | BF5 | B20 | BI4 |
| B10 | F | B5 | BF20 | BF5 | T | B20 | BF10 | BI5 |

Tab n°7: Schémas du dispositif expérimental de l'essai en plein champs



Fig n°25 : Essai en plein champs

2.1.2. Incorporation de biochar de bois et de fumier de bovin et semis du navet :

Le biochar utilisé dans l'expérience a été obtenu à partir d'une sciure de bois avec une méthode artisanale (Tuld), qui ensuite tamisé à 2 mm avant l'application. Le fumier de bovin a été obtenu à partir de la ferme centrale de notre école (ENSA), laisser en décomposition quelques mois.

Après la préparation du sol (labourage et hersage), l'expérimental a été aménagé à la taille de placette requise de 1×1 m. Les quantités de Biochar et fumier des différents traitements ont été pesés et répartis uniformément sur les différentes micro-parcelles en fonction des conditions requises sur le sol. Une houe à main a été utilisée pour incorporer les amendements dans le sol à une profondeur d'environ 10 cm 2 semaines avant le semis des graines de navet.



Fig n°26: Le navet (*Brassica rapa* L.) variété « marteau »

Le navet (*Brassica rapa* L.) variété « marteau », cultivé pour sa racine de grande taille, pivotante, bulbeuse et succulente (ITCMI, 2010).

Le semis en place a été effectué en ligne avec un espacement entre les rangs de 20 cm et 15 cm entre les plants. Un éclaircissage a été effectué par la suite; le désherbage se faisait sur une base hebdomadaire et manuellement; l'irrigation à la raie a été appliquée durant toute l'expérimentation.

2.1.3. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol :

Avant l'installation de l'expérience, l'échantillonnage du sol a été effectué au hasard sur dix échantillons différents prélevés en diagonale sur une profondeur de 20 cm. Les échantillons de sol prélevés sont ensuite regroupés, séché à l'air et tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm et analysé pour azote, phosphore, potassium, CEC, la granulométrie, matière organique du sol et le pH du sol.

-Le pH avec l'eau distillée (v/v) :

Le pH a été déterminé à l'aide du pH-mètre dans une suspension de terre fine dans l'eau distillée avec un rapport sol/eau=1/2.5.

-La conductivité électrique du sol (v/v):

Elle a été mesurée à l'aide d'un conductivimètre dans une suspension de terre fine dans l'eau distillée, avec un rapport sol/eau = 1/5.

-Le calcaire total (ou carbonates totaux):

Selon Aubert, (1922) le dosage du calcaire total fait à l'aide du calcimètre de BERNARD. Le principe de la méthode est fondé sur la réaction suivante :

-La matière organique (carbone organique):

Il est déterminé par la méthode ANNE (Benhassineet *al*, 2008): Le carbone organique est oxydé par du bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu sulfurique. La quantité réduite est proportionnelle à la teneur en carbone organique. L'excès de bichromate de potassium est titré par une solution de sel de MOHR, en présence de diphénylamine.

$$MO \% = C\% \times 1,72 .$$

C% : Le pourcentage du carbone oxydé.

MO % : Le pourcentage du Matière organique.

- L'azote total (méthode Kjeldahl).

-Le potassium échangeable extrait à l'aide de 1 M d'ammonium acétate (spectrophotomètre à flamme).

-Le phosphore assimilable du sol extrait avec $NaHCO_3$ (méthode colorimétrique).

-La CEC réalisée à l'acétate de sodium et à l'acétate de potassium (spectrophotomètre à flamme).

-Texture et granulométrie à la pipette de Robinson.

2.1.4. Détermination des paramètres de rendement:

La récolte des navets a été faite manuellement à la main, une fois déracinés les tubercules sont lavés à l'eau du robinet afin d'enlever toute trace de terre ensuite pesés sur une balance de précision pour déterminer leur poids frais. La longueur était mesurée à l'aide d'un mètre règle et le diamètre à l'aide d'un pied à coulisse.

2.1.5. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet:

La composition chimique de notre Biochar et du fumier de bovin utilisés a été analysée après séchage ensuite broyage et enfin tamiser afin d'être prêt à analysés.

Le taux de carbone organique des substrats étaient mesurées par la calcination au four à calcination (30 minutes à 500°C, puis 6h à 600°C).

Lors de la récolte du navet en 2015/2016, cinq échantillons sont prélevés par micro parcelle pesés, lavés ensuite séchés à 80 °c durant 48h enfin broyé dans broyeur végétal pour les analyses qui sont :

- L'azote total (méthode Kjeldahl).
- Le phosphore végétal révélé au réactif vanadomolibdique (méthode colorimétrique).
- Le potassium végétal extrait à l'acide nitrique 0.1N (spectrophotomètre à flamme).

2.2. Essai en pot :

2.2.1. Description du site en pot :

Signalons que cet essai a été réalisé en pot avec le mêmes sol et les mêmes doses utilisées pour l'essai en plein champs afin de pouvoir comparer les résultats avec les mêmes paramètres biométriques à savoir (poids frais du tubercule, sa longueur, son diamètre et le poids des feuilles), les concentrations des tissus en certains éléments chimiques comme l'azote total, le phosphore et le potassium et les paramètres chimiques du sol comme (la matière organique et la capacité d'échange cationique) et le pH car une bonne partie de la parcelle a été réservé pour le projet de serre.

Le dispositif expérimental adopté est « en bloc aléatoire complet », avec les mêmes doses et avec le même sol et cela dans le but de comparer l'effet des différentes doses choisies pour l'étude de l'effet du biochar et du fumier sur le navet.

Les différentes combinaisons sont les suivantes :

T1 : B5

T2 : BF5

T3 : B10

T4 : BF10

T5 : B20

T6 : BF20

T7 : F

T8 : Témoin

| | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|-----|------|------------|
| B10 | BF10 | BF20 | F | BF20 | BF10 | T | B10 | BI1 |
| BF5 | BF20 | B10 | B20 | T | T | B20 | BF10 | BI2 |
| BF20 | B20 | BF5 | B5 | F | B10 | F | T | BI3 |
| F | B5 | B20 | BF10 | B20 | BF20 | BF5 | B5 | BI4 |
| BF10 | B10 | F | BF5 | B5 | T | B5 | BF5 | BI5 |

Tab n°8 : Schémas du dispositif expérimental de l'essai en pot

2.2.2. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol:

-Le carbone organique, mesuré par la méthode ANNE (1945) au bichromate de potassium ensuite multiplier par 1.72 pour calculer la matière organique en %.

-Le pH avec l'eau distillée (v/v).

- L'azote total (méthode Kjeldahl).

-Le potassium échangeable extrait à l'aide de 1 M d'ammonium acétate (spectrophotomètre à flamme).

-Le phosphore assimilable du sol extrait avec NaHCO₃ (méthode colorimétrique).

-La CEC réalisée à l'acétate de sodium et à l'acétate de potassium (spectrophotomètre à flamme).

-Le calcaire total (calcimètre de Bernard).

2.2.3. Détermination des paramètres de rendement:

La récolte des navets a été faite manuellement à la main, une fois déracinés les tubercules sont lavés à l'eau du robinet afin d'enlever toute trace de terre ensuite pesés sur une balance de précision pour déterminer leur poids frais. La longueur était mesurée à l'aide d'un mètre règle et le diamètre à l'aide d'un pied à coulisse.

2.2.4. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet:

La composition chimique de notre Biochar et du fumier de bovin utilisés a été analysée après séchage ensuite broyage et enfin tamiser afin d'être prêts à analysés.

- L'azote total (méthode Kjeldahl).

- Le phosphore végétal révélé au réactif vanadomolibdique (méthode colorimétrique).

- Le potassium végétal extrait à l'acide nitrique 0.1N (spectrophotomètre à flamme).

2.3. Essai en pots sur sol sableux :

2.3.1. Description de l'essai :

Le but de cet essai est de contribuer à améliorer la productivité des sols pauvres du sud algérien ou autre, connu pour leur faible taux en matière organique avec les moyens disponibles tout en préservant l'environnement en mettant à la disposition de l'agriculteur un système de culture durable et rentable capable d'améliorer la productivité. Par l'évaluation de l'effet de deux amendements à savoir, le biochar de bois et le fumier de bovin seul et combiné sur un sol sableux chez le navet (*Brassicae rapa* L.) sur les paramètres physicochimiques du sol et sur les caractères physiologiques de cette culture, en vue de voir si il est envisageable de l'introduire dans les pratiques culturales actuelles et dans nos conditions pédoclimatiques.

Comme déjà cité précédemment plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité du biochar produit, d'où l'importance de le caractériser avant toute application au sol dans l'environnement donné, soit que les expérimentations soient menées en milieu contrôlé ou en plein champs. En général avec le biochar, plus le sol est pauvre plus le biochar aura un effet sur le sol. Selon Gulaqa et al., (2019) ; les sols à texture légère sableuse sont propices aux applications de biochar que les sols à texture lourde comme les sols argileux. Car les améliorations de la production végétale sont souvent enregistrées dans des sols très dégradés et pauvres en nutriments, alors que son application sur des sols fertiles et sains augmente peu ou pas toujours le rendement des cultures.

L'expérience a été conduite dans des pots en pvc répartis en plein air selon un dispositif « randomisation total » avec 5 répétitions. La variété de navet utilisée est la variété « marteau »; un semis direct a été réalisé à raison de 3 gaines par pot pour ensuite garder qu'un seul plant après éclaircissage.

Les différents traitements utilisés sont les suivantes :

T1 : Témoin

T2 : 2/3 sol + 1/3 biochar

T3 : 2/3 sol + 1/3 fumier

T4 : 1/3 sol + 1/3 fumier +1/3 biochar

T5 : 1/2 sol + 1/2 fumier

T6 : 1/2 sol + 1/2 biochar

| | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|--------------|
| T1 | T3 | T2 | T4 | T6 | T4 | Bloc1 |
| T5 | T6 | T2 | T5 | T1 | T3 | Bloc2 |
| T6 | T1 | T3 | T4 | T2 | T5 | Bloc3 |
| T2 | T5 | T4 | T3 | T6 | T1 | Bloc4 |
| T4 | T1 | T3 | T5 | T6 | T2 | Bloc5 |

Tab n°9 : Schémas du dispositif expérimental avec le sol sableux

| Propriétés | Valeurs |
|--|----------------|
| pH | 7.48 |
| N Total (NH ₄ ⁺ ppm) | 0 |
| CaCO ₃ (%) | 5.66 |
| K ⁺ (Meq/ 100g sol) | 0.13 |
| P (ppm) | 2.10 |
| CEC (cmol/kg sol) | 4.55 |
| MO (%) | 0.81 |
| Gypse | 12.23 |
| CE 10 ⁻³ ms/ cm | 4.1 |
| Sable fin (%) | 76.23 |
| Sable grossier (%) | 4.64 |
| Limon fin (%) | 11.45 |
| Limon grossier (%) | 6.12 |
| Argile (%) | 1.56 |
| Texture | sableuse |

Tab n°10 : Propriétés physico-chimiques du sol sableux

| Propriétés | Biochar | Fumier |
|---|---------|--------|
| pH | 8.29 | 4.4 |
| N Total (NH ₄ ⁺ ppm) | 0.28 | 0.61 |
| C Pendéral (%) | 93.5 | 23 |
| K ⁺ (meq 100g ⁻¹ sol) | 0.51 | 0.81 |
| P (ppm) | 2.01 | 40.79 |
| CEC (cmol/kg sol) | 3.3 | 5.28 |

Tab n°11: Compositions chimiques du biochar de bois et du fumier de bovin.

2.3.2. Détermination des propriétés physiques et chimiques du sol :

-Le carbone organique, mesuré par la méthode ANNE (1945) au bichromate de potassium ensuite multiplier par 1.72 pour calculer la matière organique en %.

-Le pH avec l'eau distillée (v/v).

- L'azote total (méthode Kjeldahl).

-Le potassium échangeable extrait à l'aide de 1 M d'ammonium acétate (spectrophotomètre à flamme).

-Le phosphore assimilable du sol extrait avec NaHCO₃ (méthode colorimétrique).

-La CEC réalisée à l'acétate de sodium et à l'acétate de potassium (spectrophotomètre à flamme).

-Le calcaire total (calcimètre de Bernard).

2.3.3. Détermination des paramètres de rendement :

La récolte des navets a été faite manuellement à la main, une fois déracinés les tubercules nettoyé afin d'enlever toute trace de terre ensuite pesés sur une balance de précision pour déterminer leur poids frais. La longueur était mesurée à l'aide d'un mètre règle et le diamètre à l'aide d'un pied à coulisse.

2.3.4. Analyse du biochar de bois et du fumier de bovin sur le navet :

La composition chimique de notre Biochar et du fumier de bovin utilisés a été analysée après séchage ensuite broyage et enfin tamiser afin d'être prêts à analysés.

Le taux de carbone organique des substrats étaient mesurées par la calcination au four à calcination (30 minutes à 500°C, puis 6h à 600°C).

Lors de la récolte du navet en 2015/2016, cinq échantillons sont prélevés par micro parcelle pesés, lavés ensuite séchés à 80 °c durant 48h enfin broyé dans broyeur végétal pour les analyses qui sont :

- L'azote total (méthode Kjeldahl).
- Le phosphore végétal révélé au réactif vanadomolibdique (méthode colorimétrique).
- Le potassium végétal extrait à l'acide nitrique 0.1N (spectrophotomètre à flamme).
- La densité apparente avec la méthode cylindrique : Le volume est estimé immédiatement sur le terrain alors que le poids est mesuré au laboratoire après séchage.

Des prélèvements d'échantillons ont été effectués au moment de la récolte pour déterminer les densités apparentes des différents traitements à l'aide des cylindres. La méthode au cylindre consiste à l'enfoncer verticalement dans le sol (sans qu'il soit perturbé), chaque échantillon est mis séparément dans un sac en papier ensuite acheminé au laboratoire, séché à l'étuve 105 °C durant 24h et enfin pesé.



Fig n° 27: Cylindre métallique

La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation :

$$D_a = P/V \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

P : Le poids sec de l'échantillon (g)

V : Le volume de l'échantillon prélevé et séché = le volume de cylindre = 75,36 cm³.

Les données recueillies dans le cadre de chaque expérience ont fait l'objet d'une analyse des éléments suivants (ANOVA) à l'aide du logiciel *statistica version 8* et les moyens de traitement ont été comparés à l'aide du Test de Tukey au niveau de probabilité $p= 0,05$.

Chapitre3

Résultats
&
Discussions

3. Résultats et discussions :

3.1. Discussion statistique :

3.1.1. Discussion statistique de l'essai en plein champs :

Le sol de notre site expérimental est d'une texture limon fin-argileuse, neutre à faible taux en matière organique, assez riche en azote total, faible taux en phosphore assimilable, moyennement riche en potassium échangeable.

Le pH du biochar été alcalin, riche en carbone organique et pauvre en azote total d'où une teneur élevée en C/N, un faible taux en phosphore assimilable mais suffisamment riche en potassium échangeable.

Le fumier était caractérisé par un pH neutre, avec des concentrations plus importantes en azote total, phosphore assimilable et en potassium échangeable par rapport au biochar.

L'utilisation du biochar et le fumier seul et en mélange a généralement causé une augmentation dans le constituant du sol à savoir le carbone organique et la CEC par rapport au témoin.

Au cours de cet essai, le fumier seul a légèrement augmenté le taux de certains éléments étudiés du sol comme la matière organique et la CEC par rapport au témoin, l'ANOVA a montré un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) avec un taux de 1.1% et de 4.35 cmol/kg sol respectivement.

En outre, l'analyse de la variance a montré un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) des différentes doses de Biochar de bois appliquées individuellement sur le pH du sol, ce dernier a augmenté en moyenne de 1,2 unité environ par rapport au témoin. La matière organique a montré une différence très hautement significative ($p \leq 0,001$) avec un maximum de 1.64% groupe (a) par rapport au témoin et une valeur maximale de 5.39 cmol/kg pour la CEC.

Les résultats montrent l'effet du mélange du fumier de bovin avec le biochar sur les propriétés chimiques du sol. En effet, au cours de cet essai, les résultats ont montrés l'effet interactif positif du mélange sur la matière organique avec un optimum de 1.86% pour la dose du mélange (B20*F) et un minimum de 1.12% avec la dose du mélange (B5*F) ; qui étaient nettement supérieur par rapport au témoin.

Pour la CEC, l'analyse de la variance a montré des différences très hautement significatif ($p \leq 0,001$) avec un maximum de 5.54 cmol/kg sol pour le traitement B20*F groupe (a) chez les différentes doses des mélanges utilisés.

L'effet du mélange des deux substrats sur le pH a montré une différence très hautement significatif ($p \leq 0,001$) principalement pour les doses des mélanges (B10*F) et (B20*F) qui sont de 8.15 et 8.28 respectivement et qui étaient supérieur groupe (a) par rapport au témoin et au fumier seul.

L'effet interactif de Biochar x fumier été très hautement significatif ($p \leq 0,001$) pour la CEC, carbone organique et le pH du sol par rapport au témoin pour cet essai.

En général, l'ANOVA a fait ressortir un effet très hautement significative ($p \leq 0,001$) et positif du fumier seul sur les concentrations en azote, phosphore ($p \leq 0,001$) et en potassium ($p \leq 0,05$) dans les tissus du tubercule du navet.

Dans cet essai l'effet du biochar appliqué seul avec les différentes doses a eu un effet très hautement significatif ($p \leq 0,001$). Les réponses étaient différentes sur les concentrations en éléments nutritifs dans les tubercules du navet, en effet, la teneur en azote total été faible pour 5 t/ha et 20 t/ha, alors quelle été la plus marquante pour la dose de 10t/ha.

Pour le potassium, les résultats ont montrés que pour l'ensemble des différentes doses appliqué avec le biochar seul, l'effet été significatif ($p \leq 0,05$) par rapport au témoin.

Pour le phosphore, l'ANOVA a montré des différences très hautement significatives ($p \leq 0,001$). En effet, il a sensiblement diminué pour la dose de 10t/ha et 20t/ha alors qu'il a que légèrement augmenté pour le traitement 5t/ha avec le biochar seul.

Pour le taux de potassium, le biochar seul a donné des différences significatives ($p \leq 0,05$) entre les différents traitements dans les tissus du tubercule du navet.

En fin, l'analyse de la variance a fait ressortir un effet interactif entre les différentes doses de Biochar et la dose du fumier qui été très hautement significatif ($p \leq 0,001$) pour l'ensemble des éléments chimiques étudiés à savoir l'azote et phosphore et significatif ($p \leq 0,05$) pour le potassium.

Les résultats sur l'effet du Biochar et du fumier sur les composantes de rendement du navet sont les suivantes :

Lorsque le biochar de bois et le fumier de bovin sont étudiées individuellement sur les paramètres biométriques liés au rendement du navet; on a remarqué que le fumier de bovin a augmenté le poids des feuilles, la longueur des tubercules, le poids des tubercules et le diamètre des tubercules en ayant les valeurs les plus élevées avec le meilleurs rendement ($p \leq 0,001$) groupe (a).

Nos résultats ont démontrés une relation positive entre les différents mélanges des doses du biochar avec la dose du fumier sur les paramètres du sol étudiés à savoir la matière organique du sol et la CEC par contre on a soulevé un effet synergique négatif des mélanges sur les paramètres du rendement dans nos conditions d'essai sur le navet.

Cette étude sur terrain a été conçue pour déterminer l'effet de différentes doses de biochar (B) 5,10, 20 t/ha seules et mélangées à du fumier (F) 10 t/ha sur des navets. Les résultats ont montré que la MO (matière organique) était de 93,7% au maximum pour (B20*F) et de 14,5% au minimum pour (F) ; le taux La CEC (capacité d'échange de cations) a montré un maximum de 32,2 % pour (B10*F) et un minimum de 0,2 % avec (B5*F) par rapport au témoin (T) et enfin le pH à augmenter avec un maximum valeur de 11,2 % pour (B20*F) et une valeur minimale de 1,7 % pour (F) par rapport à (T).

Pour les paramètres chimiques du navet, le taux maximal d'azote était de 93,8 % avec (B10) et 2 % pour (B20). La valeur la plus élevée pour le phosphore a été enregistrée en (F) et une valeur minimale

en (B5) ($p \leq 0.01$). Le niveau de potassium était élevé de 4,2 % pour le traitement (B20*F), la valeur la plus faible étant 4,4% pour (B5) et (B10) par rapport à (T).

Pour les composantes du rendement, le poids frais du bulbe le plus important a été obtenu avec (F) avec la valeur de 116,8 % et un poids minimum de 0,4 % dans le traitement (B5). La longueur la plus élevée de l'ampoule était de 36,8 % en (F) et la valeur la plus faible était de 0,5 % obtenue avec (B20*F). Le diamètre du bulbe était de la plus grande dans le traitement (F) et la plus petite était de 4,8 % dans (B20). Enfin, le poids frais des feuilles ont montré un maximum de 106,9% en (F) et une augmentation de 6% en (B20) par rapport à (T).

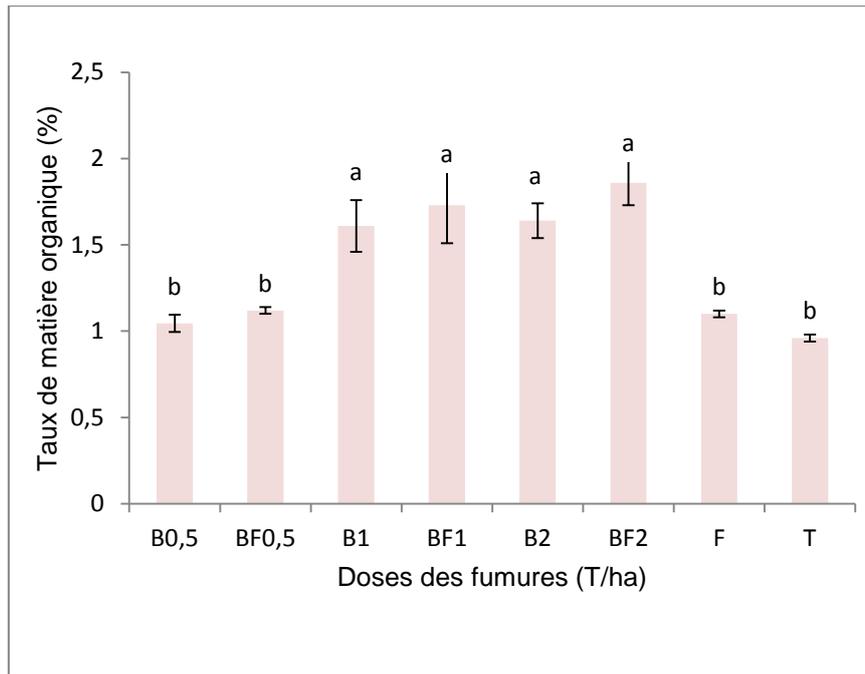


Fig n°28: Le taux de matière organique en fonction des doses

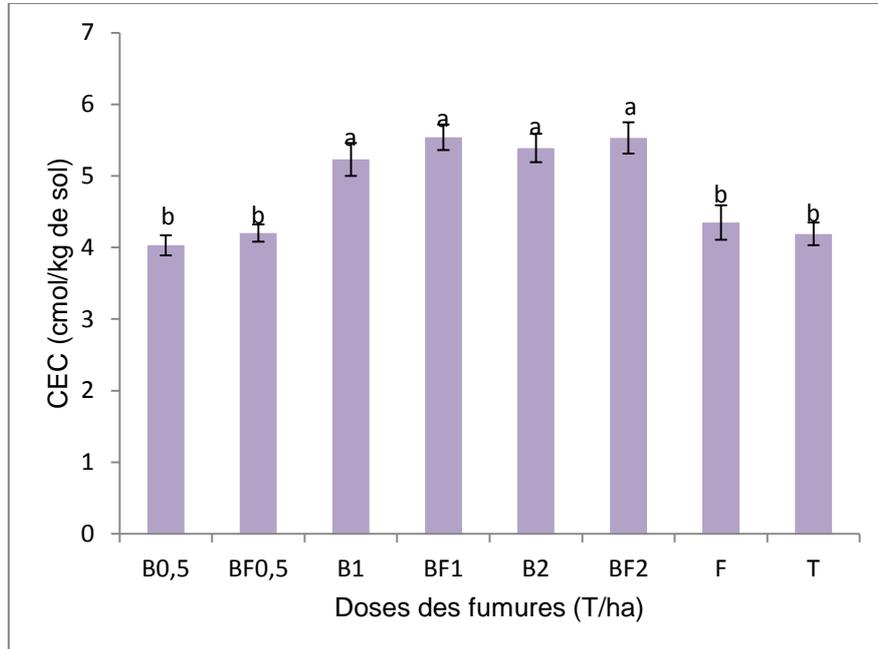


Fig n°29: La CEC en fonction des doses

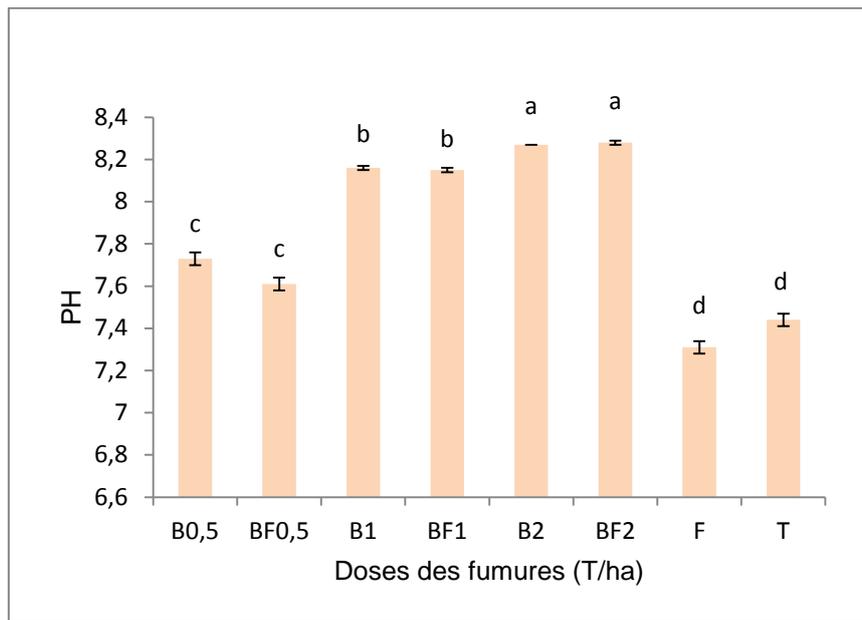


Fig n°30 : Le pH du sol en fonction des doses

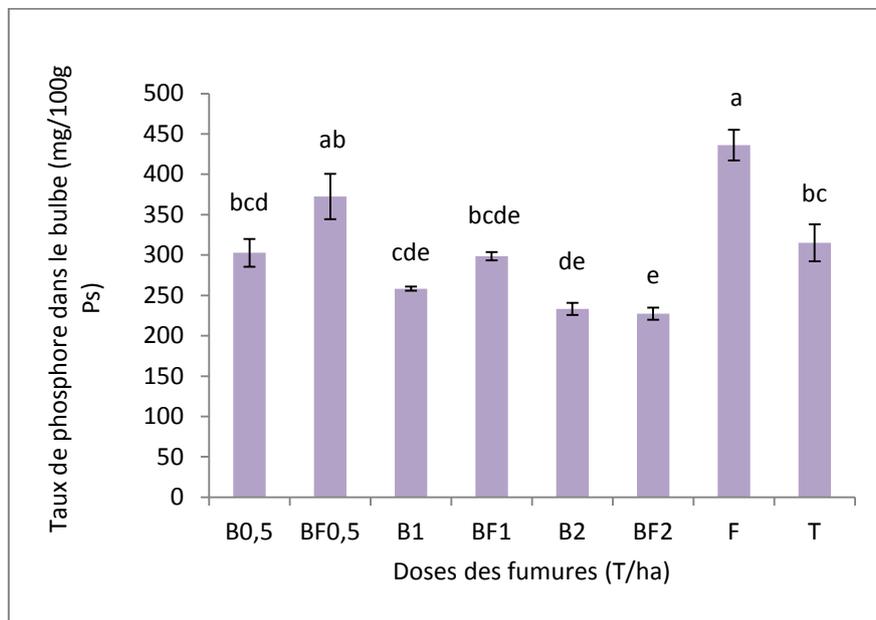


Fig n°31: Le taux de phosphore dans le bulbe en fonction des doses

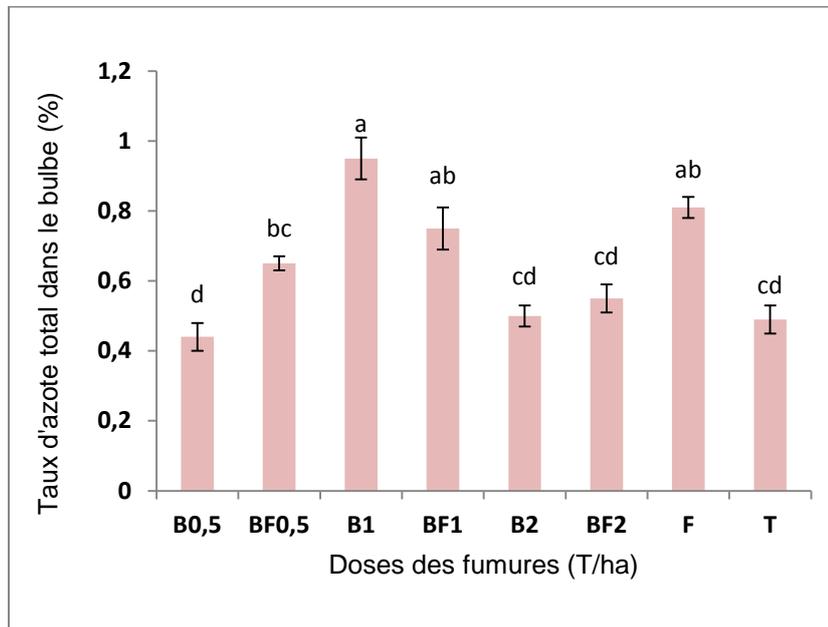


Fig n°32 : Le taux d'azote dans le bulbe en fonction des doses

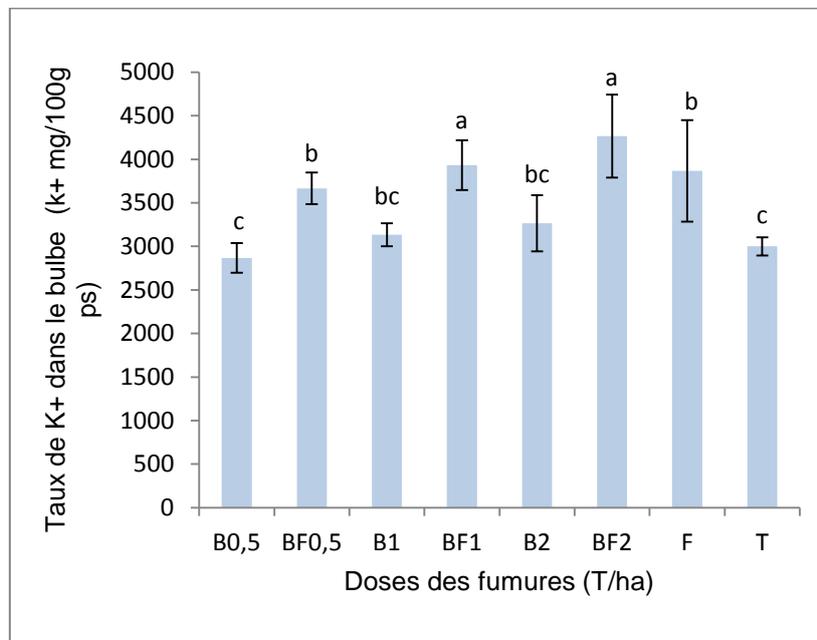


Fig n°33 : Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses

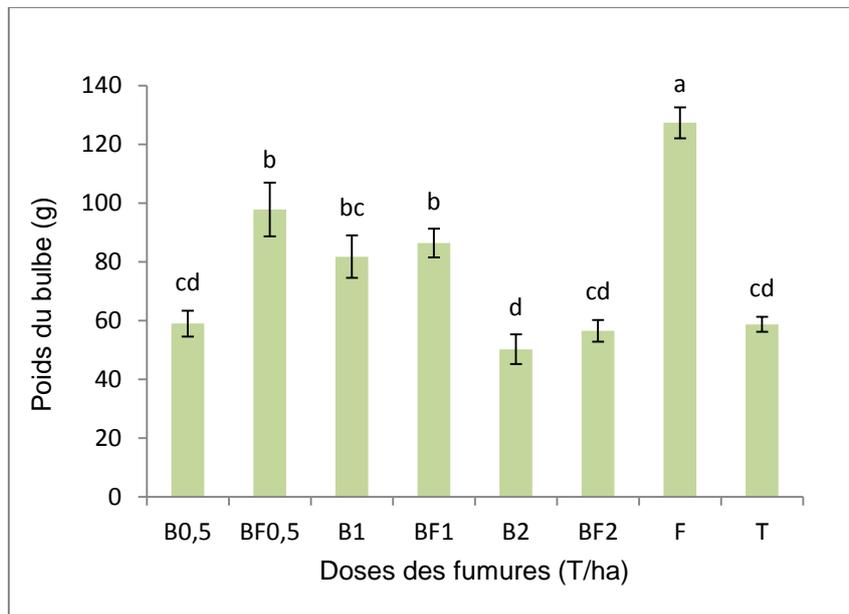


Fig n° 34 : Le poids du bulbe en fonction des doses

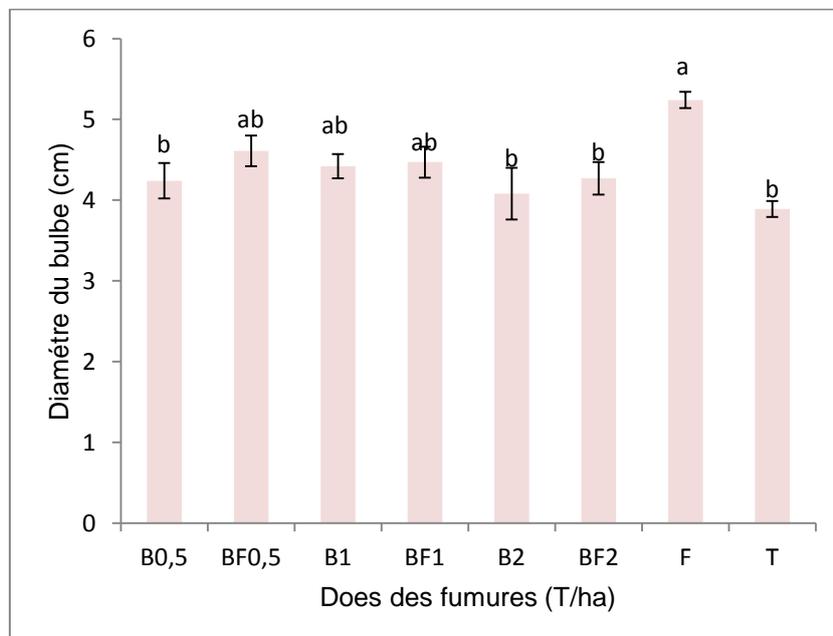


Fig n°35 : Le diamètre du bulbe en fonction des doses

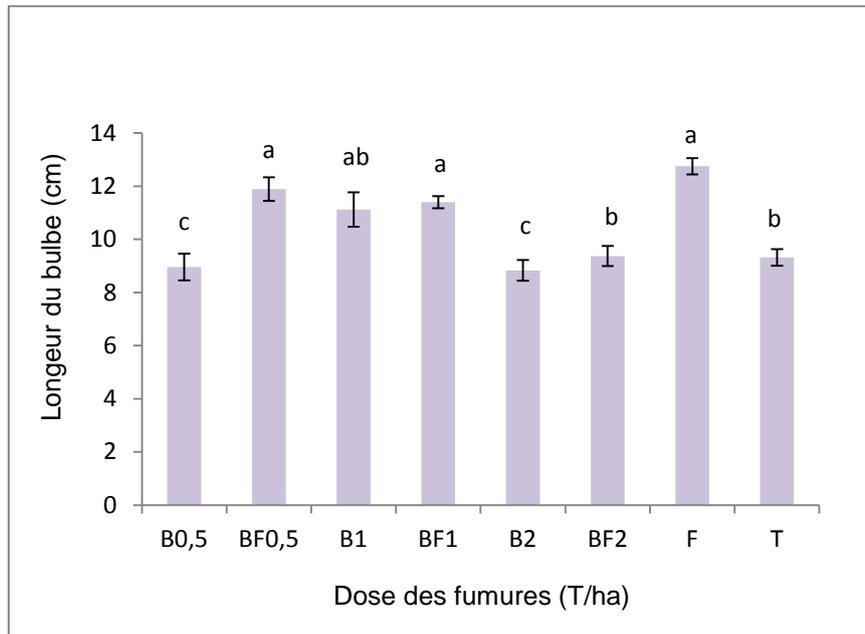


Fig n°36 : La longueur du bulbe en fonction des doses

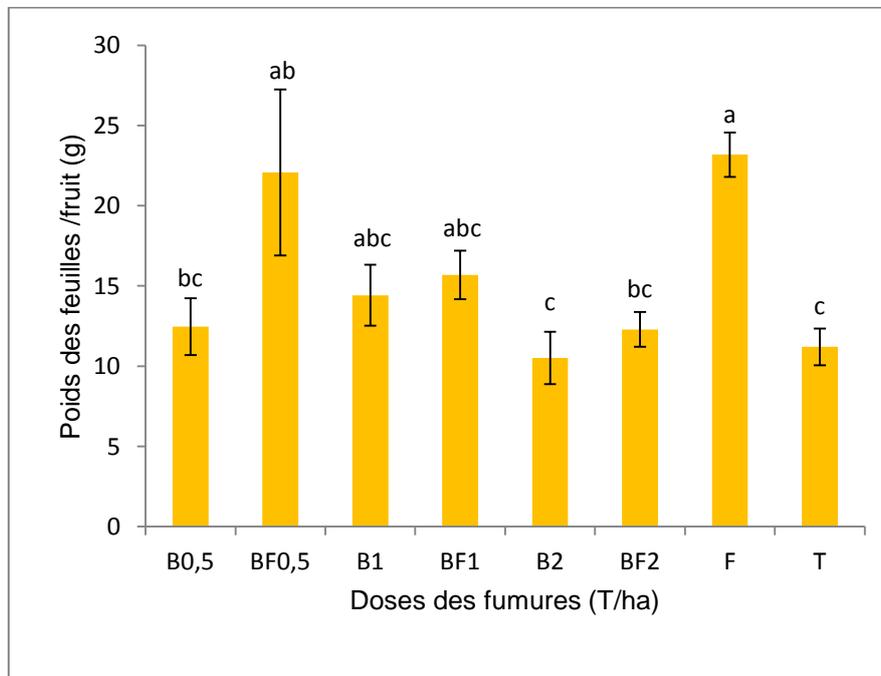


Fig n°37 : Le poids des feuilles par fruit en fonction des doses

3.1.2. Discussion statistique de l'essai en pot avec sol limoneux :

Pour cet essai l'analyse de la variance montre l'effet interactif positif du mélange du fumier de bovin avec le biochar de bois sur les propriétés chimiques du sol à savoir la CEC, le pH du sol et le carbone organique par rapport au témoin. En effet, l'ANOVA a montré un effet très hautement significatif ($p \leq 0,001$) pour la CEC avec un pic de 5.56 cmol/kg chez le traitement mélange B₂F par rapport aux autres traitements au témoin. Les traitements B10, B10*F, B20 et B20*F appartiennent au même groupe (a).

Pour le taux de la matière organique, l'ANOVA a enregistré des différences très hautement significatives ($p \leq 0,001$) avec une valeur maximale de 2.11% et une valeur minimale de 1.11% chez B20*F et B5 respectivement. La dose B20*F se démarque des autres traitements avec un groupe unique (a).

Des effets très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) entre les traitements ont été enregistrés pour le paramètre pH, une augmentation de plus d'une unité environ chez les traitements B10, B10*F, B20 et B20*F par rapport aux traitements B5*F, F et le témoin.

Par ailleurs l'ANOVA a montré que les résultats sur l'effet du biochar de bois et du fumier de bovin sur la concentration en éléments nutritifs dans les tissus des tubercules des navets été très hautement significative ($p \leq 0,001$). En effet, pour le phosphore la plus grande concentration a été enregistrée chez le traitement fumier seul (F) avec une valeur de 448.99 mg/100g de poids sec qui se démarque avec un groupe unique (a) et la plus faible obtenue chez B20*F 229.32 mg/100g de poids sec avec un autre groupe unique (c) à part par rapport aux autres traitements et au témoin.

Pour l'azote total, il a enregistré un maximum de 0.86% chez le fumier seul (F) avec des différences très significatives ($p \leq 0,001$) par rapport au reste des autres traitements et au témoin, ce dernier a enregistré une valeur de 0.49%.

Concernant le potassium l'ANOVA a révélée des différences très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements, le taux maximal a été enregistré chez le fumier seul (F) avec une valeur de 4533.33 mg/100g de poids sec qui se démarque avec un groupe unique (a), et la valeur minimale a été obtenue chez B5*F avec une valeur de 2199.99 mg/100g de poids sec par rapport aux reste des traitements.

Nos résultats ont fait ressortir un effet interactif entre les différentes doses de Biochar et la dose du fumier pour l'ensemble des éléments chimiques étudiés à savoir l'azote et phosphore et le potassium au niveau des tissus du navet.

Les résultats de l'analyse de la variance sur l'effet du Biochar et du fumier sur les composantes de rendement du navet ont fait ressortir des résultats avec des différences très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements fumier et biochar seul et en mélange.

En effet, pour les différents paramètres biométriques, les traitements statistiques ont montré un effet très hautement significatives ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements. Une valeur minimale de 50.29g et maximale de 99.85g a été enregistré chez (B20) et le fumier seul (F) respectivement pour le poids frais du bulbe se détachant des autre traitements avec un groupe à part (c) et (a) respectivement.

Une valeur minimale chez 6.96 g et une maximale de 17.02 g chez les traitements (B20*F) et (B5*F) respectivement pour le paramètre poids frais des feuilles.

Pour le diamètre d'un bulbe, la plus grande valeur a été enregistrée avec la dose du fumier seul (F) qui est de 4.74 cm et la valeur la plus faible a été enregistrée avec la dose (B20*F) avec une valeur de 3.24 cm se démarquant des autres traitements avec des groupes différents. Et en fin pour le paramètre longueur du bulbe frais la valeur maximale a été enregistrée avec la variante (B10*F) qui est de 11.29 cm et la plus faible a été obtenue avec (B20*F) qui est de 7.37 cm.



Fig n°38: Les navets des différents traitements

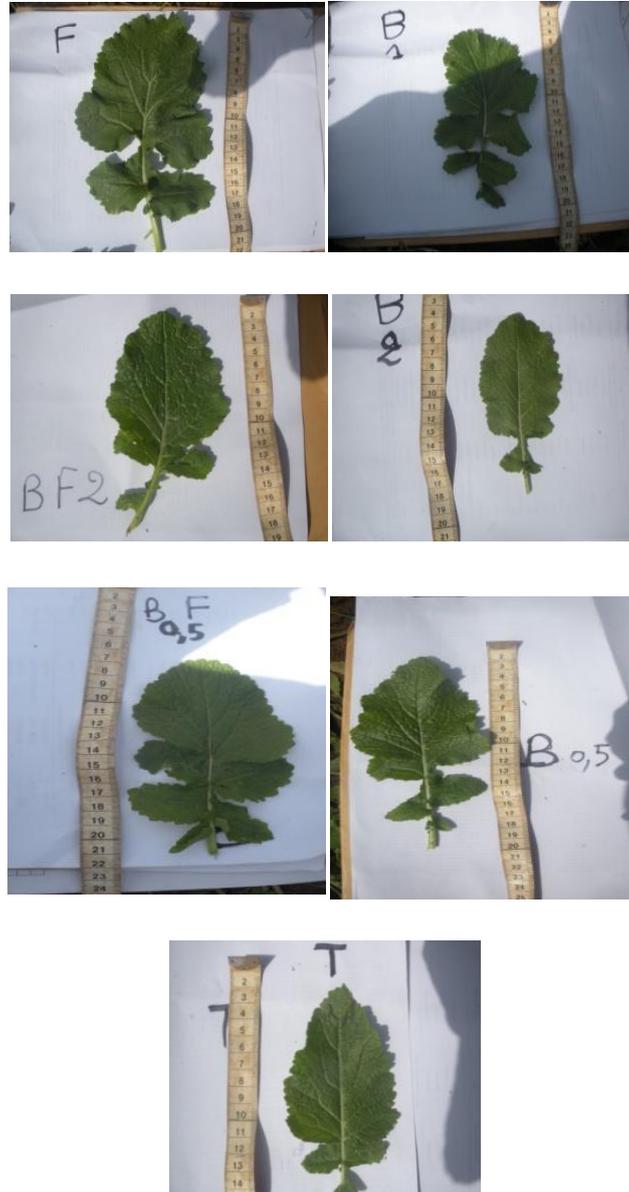


Fig n°39 : Les feuilles de navet des différents traitements

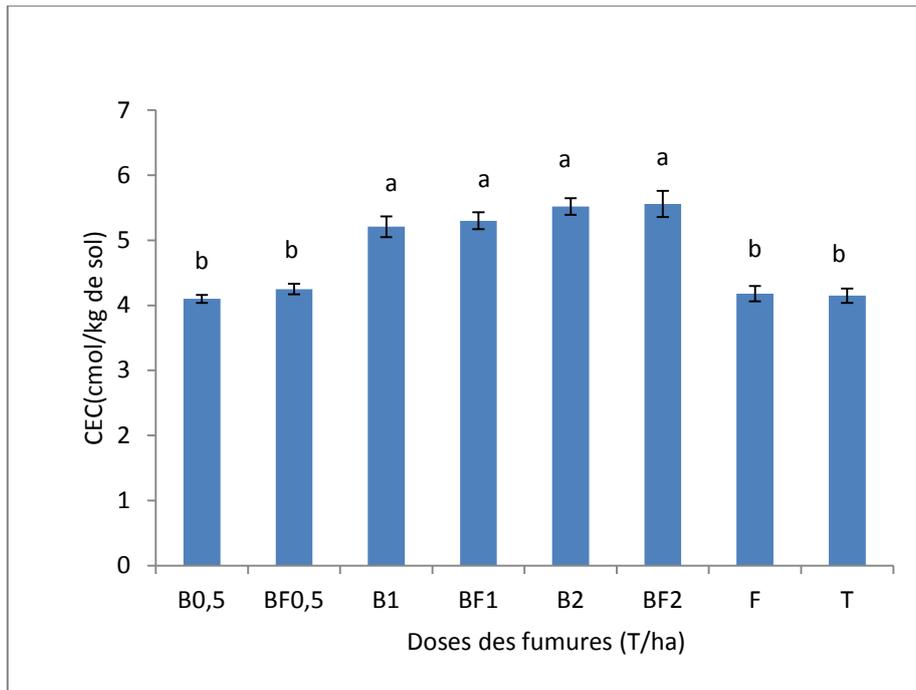


Fig n°40 : La CEC en fonction des doses

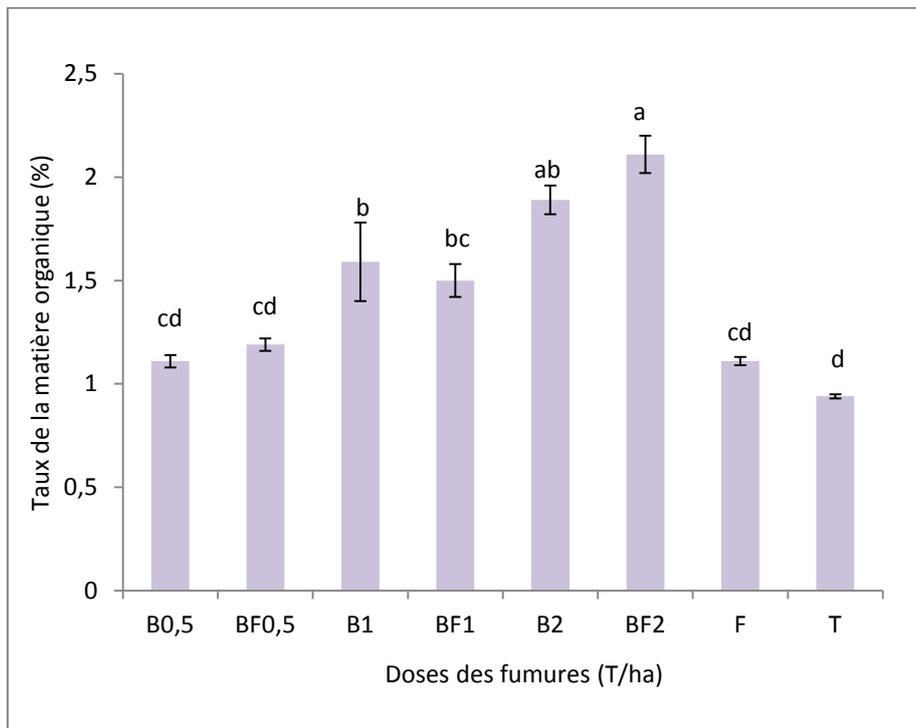


Fig n°41 : Le taux de la matière organique en fonction des doses

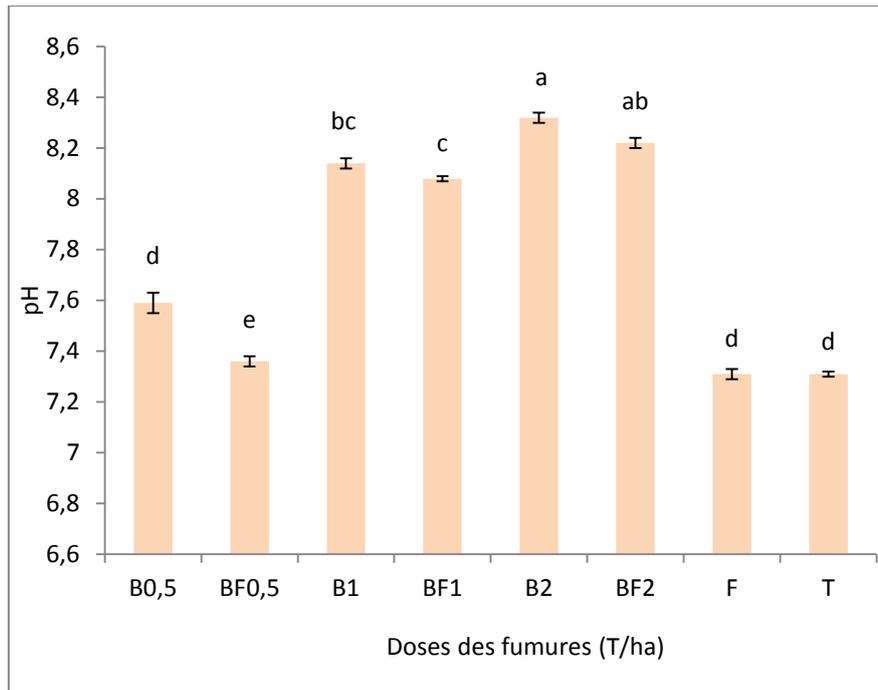


Fig n°42 : Le pH du sol en fonction des doses

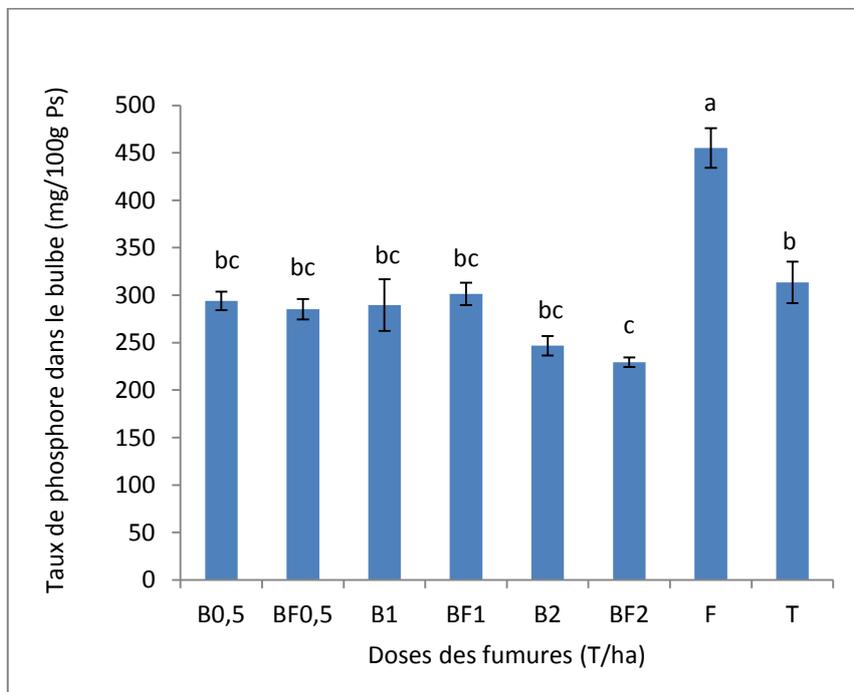


Fig n°43 : Le taux de phosphore dans le bulbe en fonction des doses

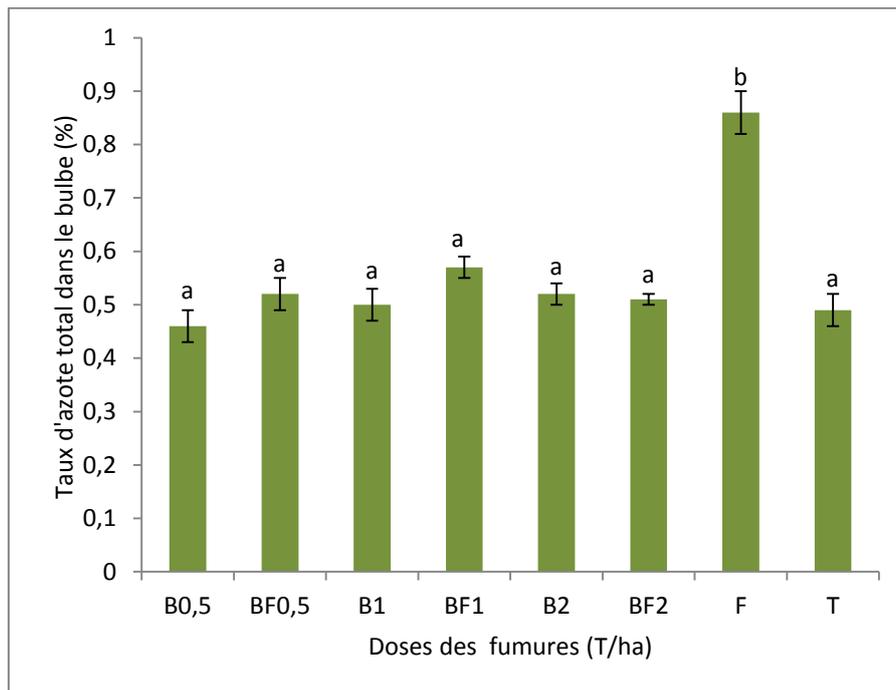


Fig n°44 : Le taux d'azote dans le bulbe en fonction des doses

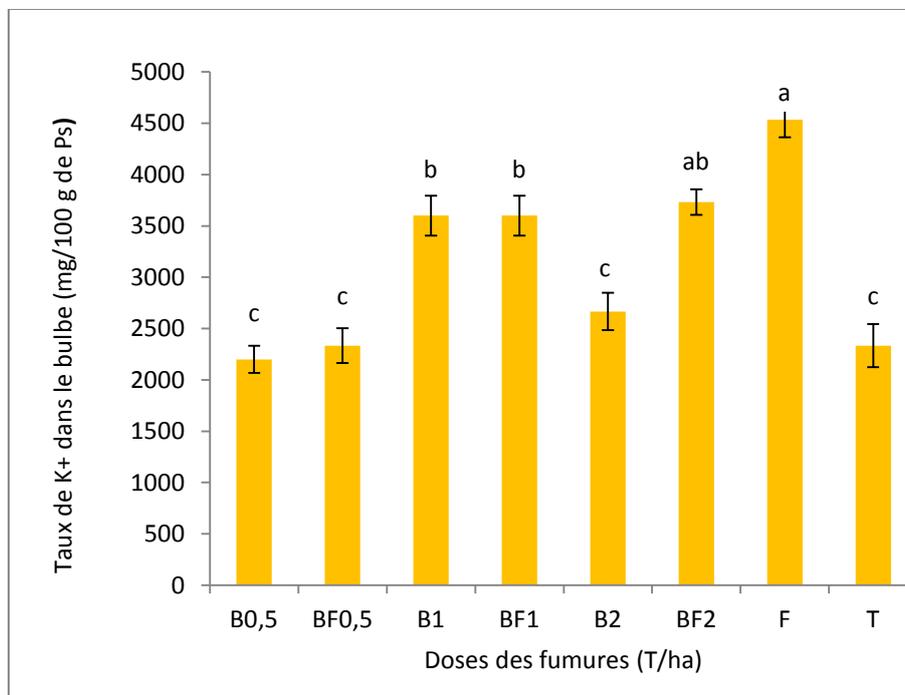


Fig n°45 : Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses

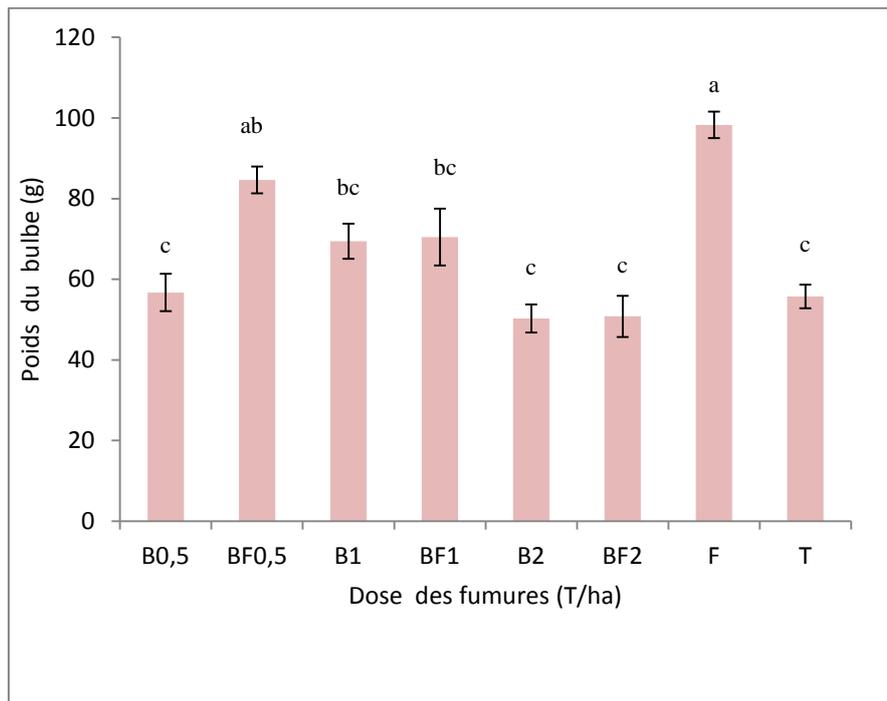


Fig n° 46 : Le poids du bulbe en fonction des doses

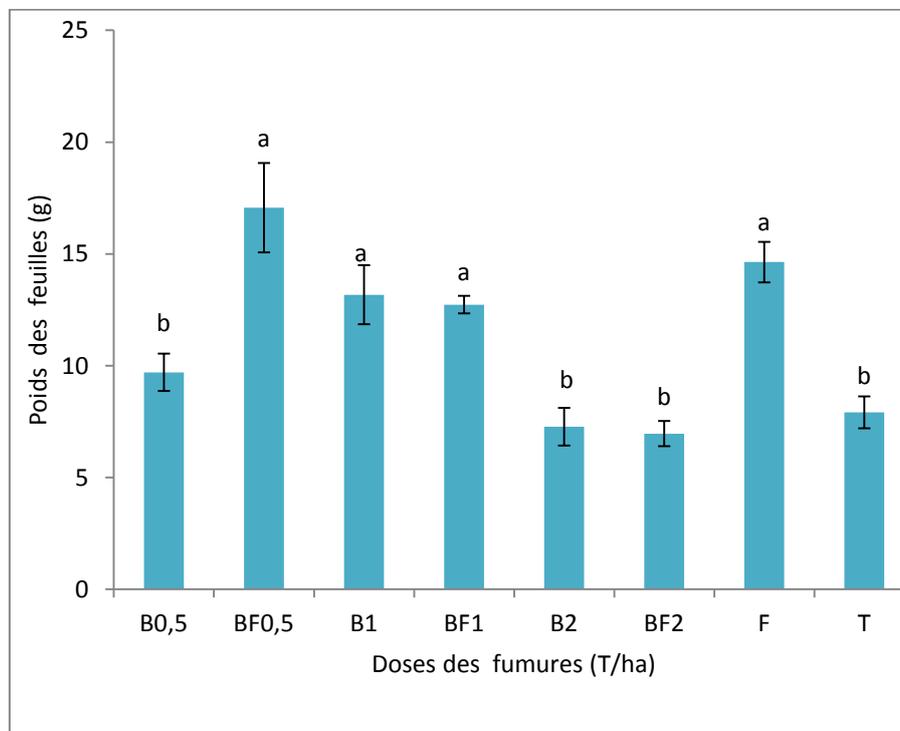


Fig n°47 : Le poids des feuilles en fonction des doses

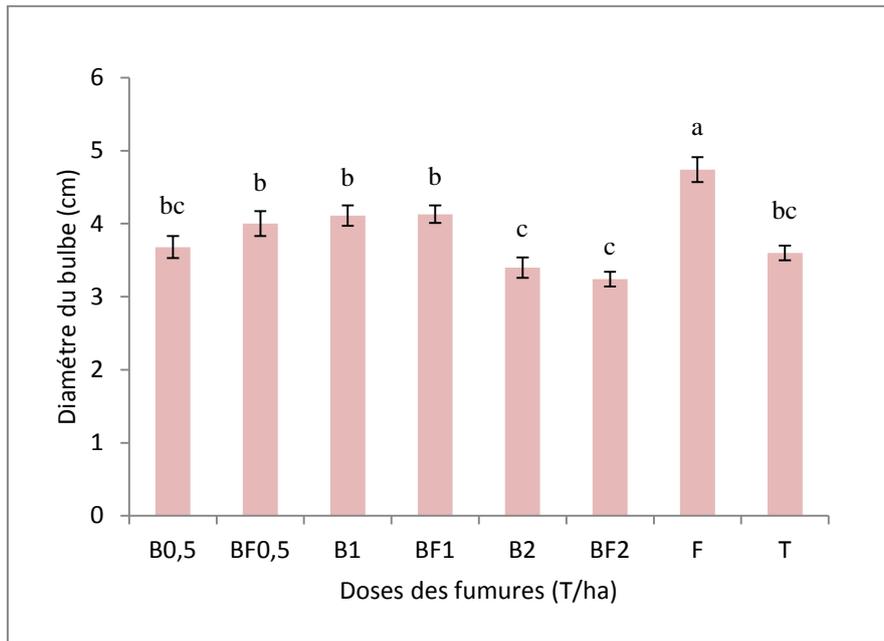


Fig n° 48 : Le diamètre du bulbe en fonction des doses

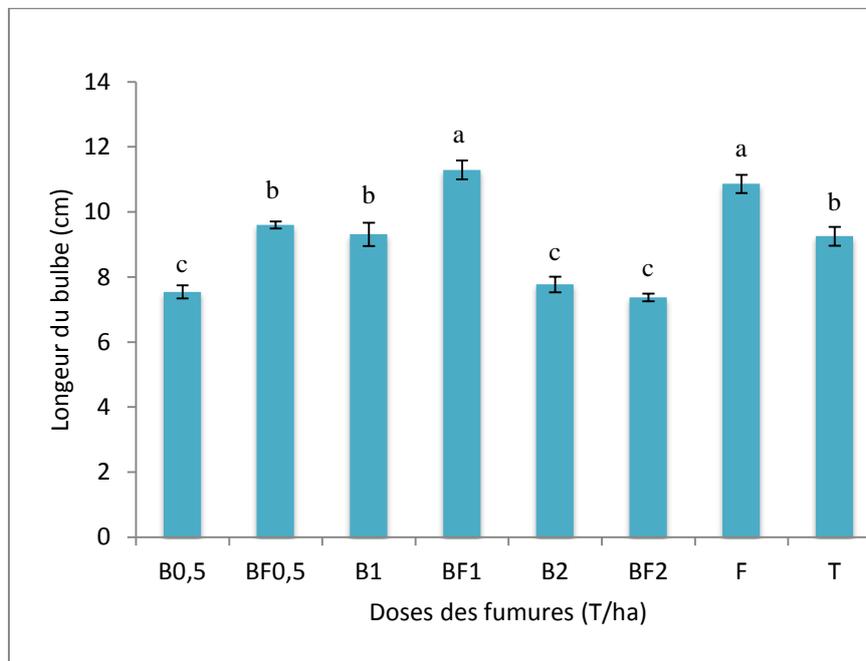


Fig n° 49 : La longueur du bulbe en fonction des doses

3.1.3. Discussion statistique de l'essai en pot avec le sol sableux :

Pour cet essai l'analyse de la variance montre l'effet interactif positif du mélange du fumier de bovin avec le biochar de bois sur les propriétés chimiques du sol à savoir la CEC, le pH du sol et le carbone organique du sol par rapport au témoin. En effet, l'ANOVA a montré des effets très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) pour la CEC avec un pic de 4.05 cmol/kg avec le traitement mélange S2F2B2 par rapport au témoin qui se démarque avec un groupe unique des autres traitements.

Pour le pH deux valeurs maximales ont été enregistrées chez les traitements B2S et S3SB3 de 8.26 et 8.24 respectivement qui chacun est représenté par un groupe homogène différent par rapport au témoin et aux autres traitements avec un effet très hautement significatif ($p \leq 0,001$). Pour la matière organique la plus grande valeur a été signalée chez le traitement S2F2B2 avec une valeur de 1.26% et qui ressort avec un groupe à part.

Par ailleurs l'ANOVA a montré que les résultats sur l'effet du Biochar de bois et du fumier de bovin sur la concentration en éléments nutritifs dans les tissus des tubercules des navets ont été très hautement significatif ($p \leq 0,001$). En effet, pour le phosphore la plus grande concentration a été enregistrée chez le traitement (S2F2B2) avec une valeur de 318.06 mg/100g de poids sec représenté par un groupe homogène différent.

Pour le potassium et l'azote total, ils ont enregistré un maximum de 2399.99 K⁺ mg/100g de poids sec avec un groupe homogène à part et 0.66% respectivement chez le mélange (S2F2B2) avec aussi un seul groupe homogène selon le test de Tukey avec des effets très hautement significatifs ($p \leq 0,001$).

Pour le phosphore au niveau des tissus du navet, l'ANOVA a montré que les traitements avec le fumier seul à savoir S3F3 et F2S ont donné des résultats meilleurs ($p \leq 0,001$) à savoir 304.08 et 312.7 de phosphore en mg/100g de poids sec par rapport aux traitements biochar seul à savoir (B2S) et (B3S3) avec des valeurs de 284.99 et 241.24 de phosphore en mg/100g de poids sec. Ces valeurs restent sensiblement faibles par rapport aux normes accordées au navet.

Nos résultats ont fait ressortir un effet interactif entre les différentes doses de Biochar et la dose du fumier au niveau des traitements en mélange ($p \leq 0,001$) pour l'ensemble des éléments chimiques étudiés à savoir l'azote et phosphore et le potassium.

Les résultats sur l'effet du Biochar et du fumier sur les composantes de rendement du navet dans un sol sableux ont fait ressortir des résultats avec des différences très hautement significatives ($p \leq 0,001$) entre les différents traitements fumier et biochar seul et en mélange.

Pour les différents paramètres de rendement, les traitements statistiques ont montré des effets très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) avec le fumier de bovin seul (S3F3) et (F2S) et en mélange (S2F2B2) et cela pour tous les paramètres de rendement étudiés à savoir le poids des feuilles, la longueur des tubercules, le poids des tubercules et le diamètre des tubercules en ayant les valeurs les plus élevées avec la meilleure production.

En effet, pour le paramètre poids frais du fruit les meilleurs résultats ont été obtenus avec les traitements avec le fumier seul à savoir (S3F3) et (F2S) avec des valeurs de 54.28 et 26.21 g se distinguant avec deux groupes homogènes différents, et aussi avec le traitement mélange (S2F2B2) avec la valeur de 42.17g. Les valeurs minimales ont été enregistrées avec les traitements au biochar seul à savoir (B3S3) et (B2S) avec des valeurs de 4.23 et 6.26g respectivement ressortant des groupes homogènes différents.

Pour le diamètre du bulbe, la plus grande valeur a été enregistrée avec la dose du fumier seul (F) qui est de 3.51 et 2.69 cm chez les traitements (S3F3) et (F2S) respectivement avec des groupes homogènes différents, ainsi qu'avec le mélange (S2F2B2) avec une valeur de 3.22 cm avec un effet très hautement significatif ($p \leq 0,001$). Les faibles valeurs ont été enregistrées avec les traitements au biochar seul (B3S3) et (B2S) avec des valeurs de 0.4 et 1.4 cm respectivement et avec des groupes.

L'analyse de la variance a montré des effets très hautement significatifs ($p \leq 0,001$) des deux fumures sur la densité apparente. La plus faible valeur a été enregistrée chez le traitement S2F2B2 qui est de 0.64g/cm³ alors que la plus grande valeur a été enregistrée chez le témoin qui est de 1.09g/cm³

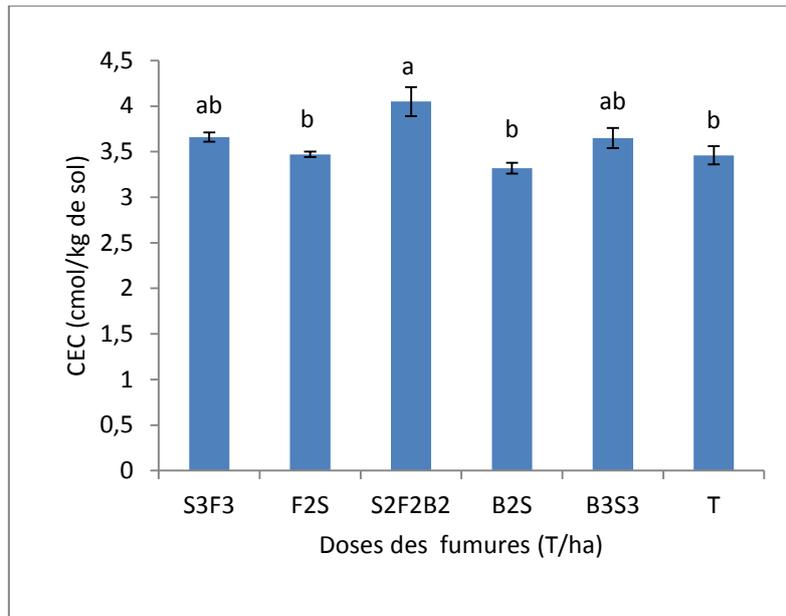


Fig n°50 : La CEC en fonction des doses

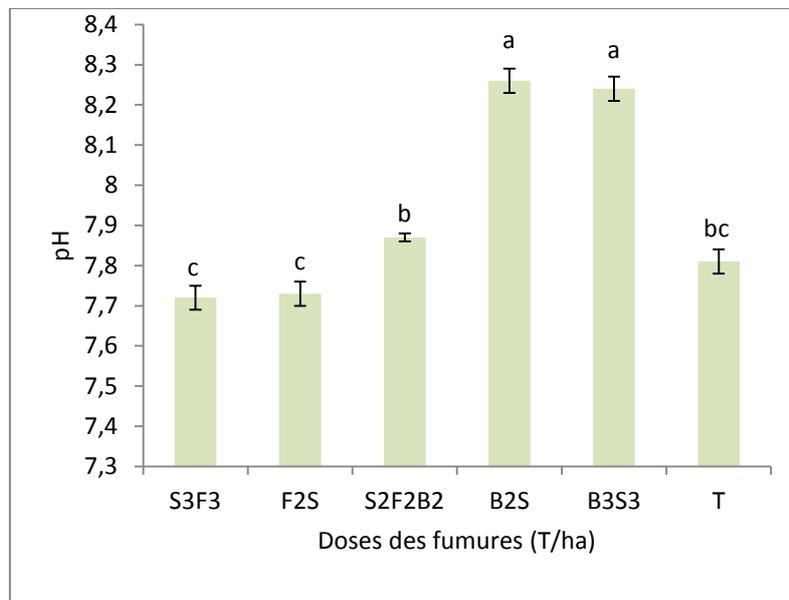


Fig n°51 : Le pH du sol en fonction des doses

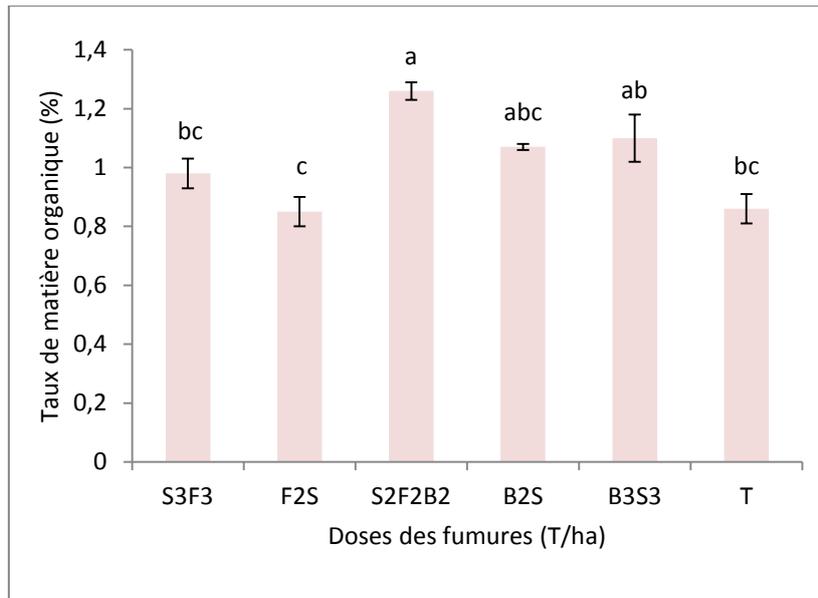


Fig n°52 : Le taux de la matière organique en fonction des doses

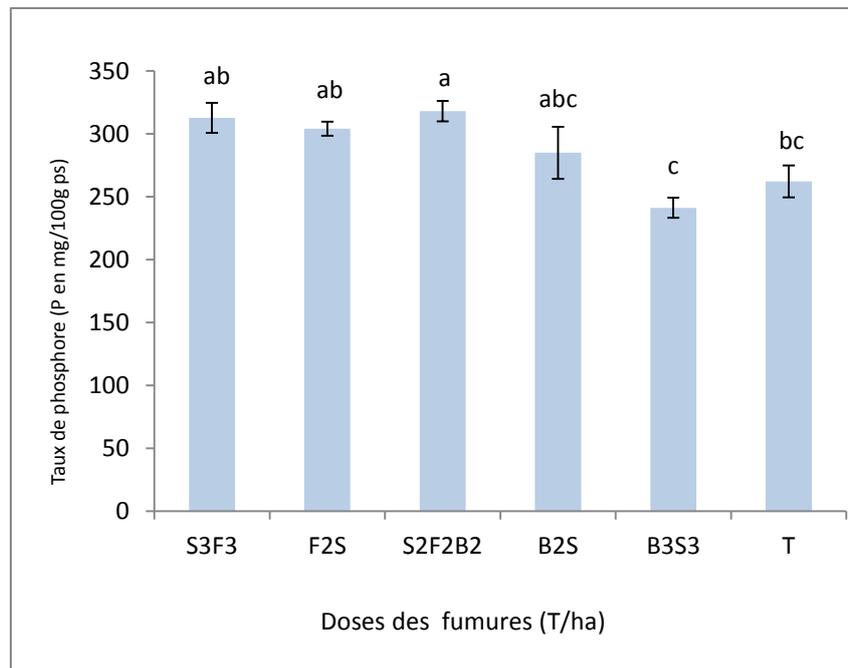


Fig n°53 : Le taux de phosphore en fonction des doses

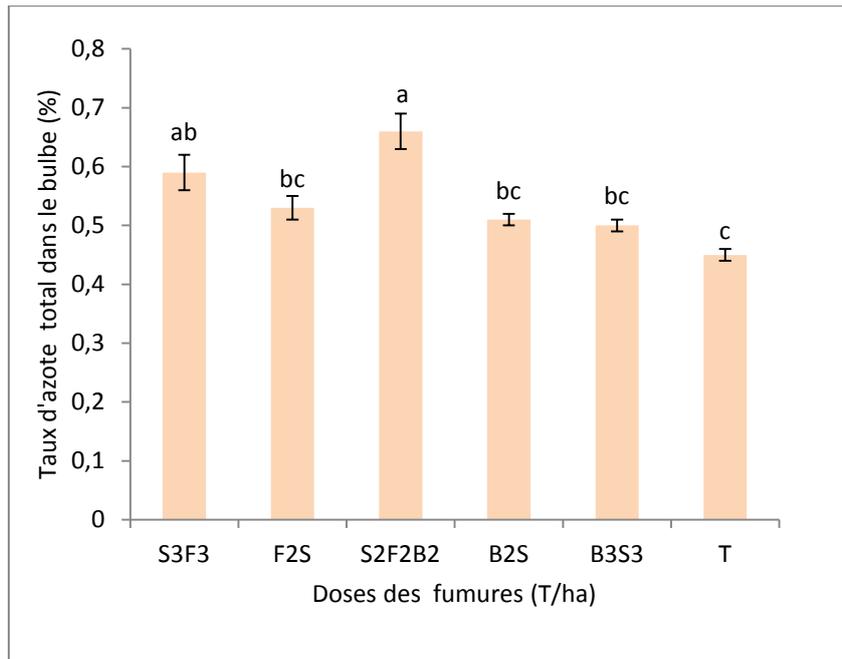


Fig n°54 : Le taux d'azote dans le bulbe en fonction des doses

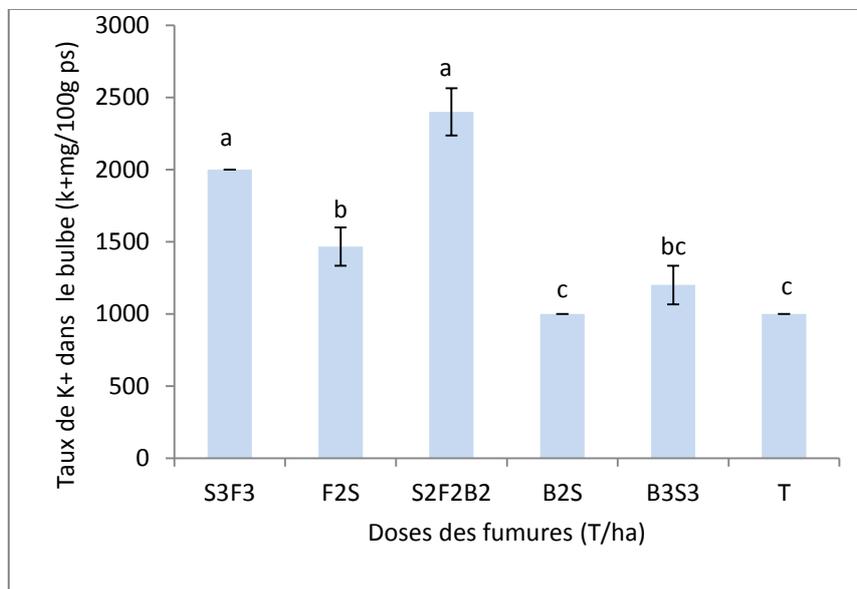


Fig n°55 : Le taux de potassium dans le bulbe en fonction des doses

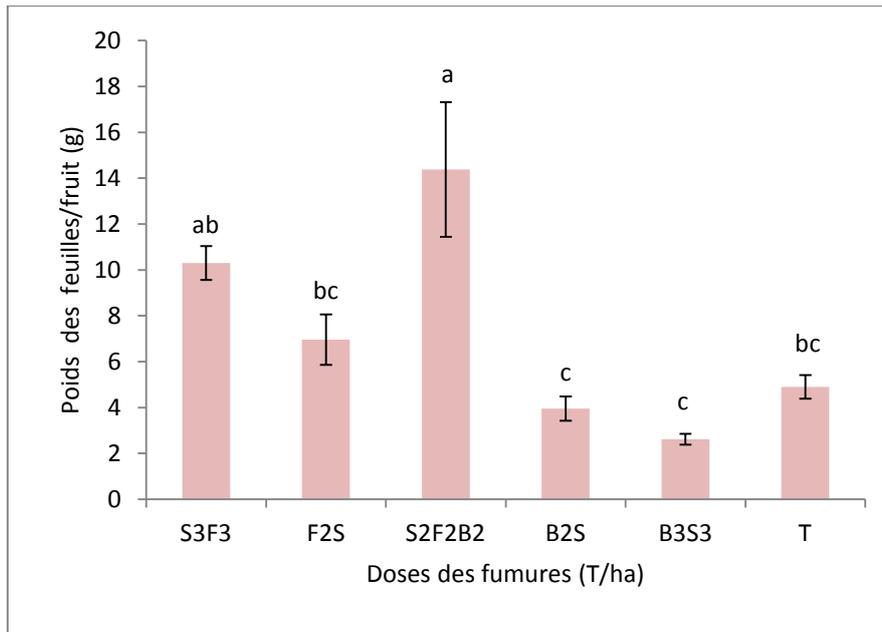


Fig n°56 : Le poids des feuilles en fonction des doses

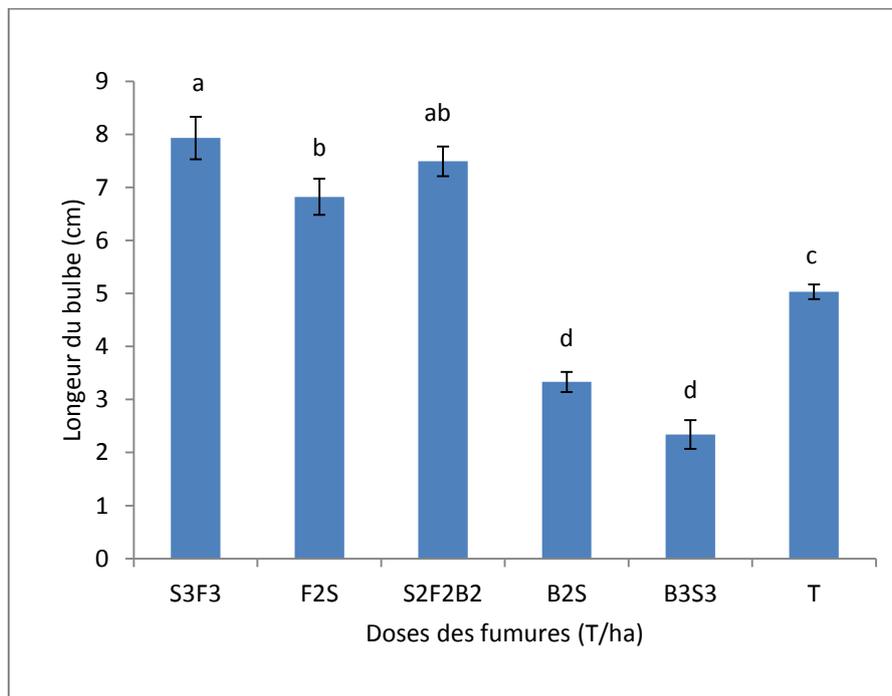


Fig n°57 : La longueur du bulbe en fonction des doses

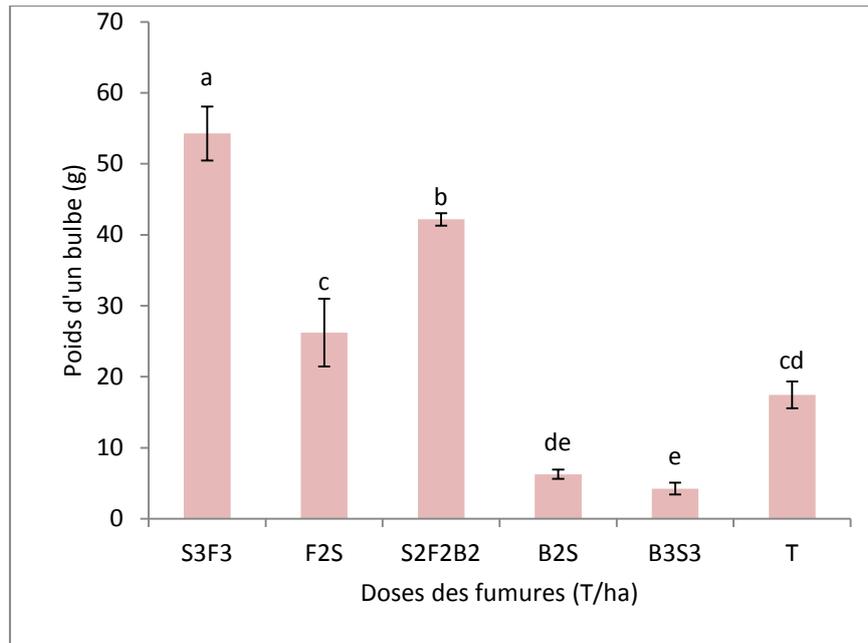


Fig n° 58 : Le poids du bulbe en fonction des doses

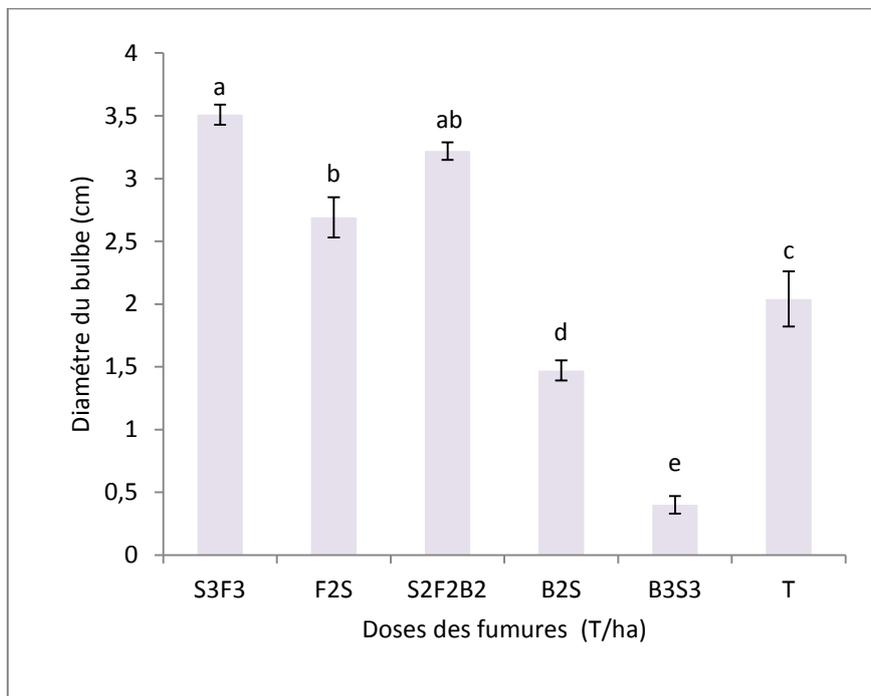


Fig n°59 : Le diamètre du bulbe en fonction des doses

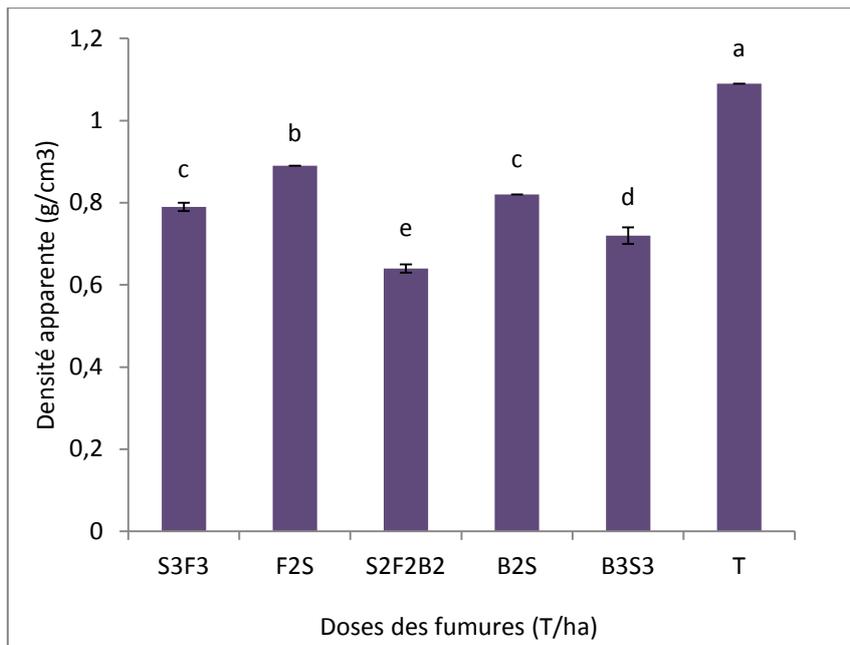


Fig n°60 : La densité apparente en fonction des doses

3.2. Discussion des résultats de l'essai en plein champs et en pot :

3.2.1. Effet de l'apport du biochar de bois seul :

Les propriétés du biochar varient fortement dans leur contenu minéral et leur pH, tout autant dans leurs propriétés physiques (Chan et al., 2007 ;Lehmann, 2007). Avant d'appliquer le biochar il est important de noter que lors de la pyrolyse tout l'azote contenue dans la biomasse originelle est soit piégé dans la structure aromatique ou bien volatilisé (Steiner et al., 2010). L'ajout de biochar «frais» aux sols se traduit souvent par ce qui est appelé «choc d'azote» de sorte que le biochar absorbe rapidement tout l'azote disponible dans les sols environnants, limitant ainsi sa disponibilité pour les plantes (Alexis et al., 2007 ;Chan et al., 2008). D'après Sanchez-Garcia et al., (2015), l'affinité naturelle du Biochar avec l'azote permet de libérer des petites quantité d'azote nécessaire aux microorganismes et aux plantes dans le sol, par conséquent le biochar n'apportera pas l'azote nécessaire d'où la nécessité d'associer au biochar une source d'azote comme le fumier afin d'éviter le phénomène d'immobilisation ce qui a été observé avec la dose 10t/ha (essai plein champs). Alexis et al., (2007) ont rapporté qu'à court terme, le biochar peut occasionner une immobilisation de l'azote dans le sol qui aide à retenir l'azote. Nos résultats démontrent que les valeurs des différents traitements à savoir 5 et 20t/ha de biochar seul se rapprochent du témoin à l'exception du traitement 10t/ha qui a marqué la plus grande valeur par rapport au témoin et aux restes des traitements.

Foster et al., (2016), ont démontré qu'avec une dose de 30t/ha de biochar, aucune diminution ni aucune augmentation d'azote dans le sol à pH alcalin chez le Mais n'a été observer. Ce qui rejoint nos résultats.

Selon Chen et al., (2020), la dose de (4%) de biochar animal ou végétal peuvent entraîner l'immobilisation de nutriments dans les sols, en particulier l'azote minéral dans un premier temps, ce qui limiterait par conséquent la croissance chez (*Brassica rapa* subsp. *Chinensis*). Le biochar de bois seul n'a pas pu augmenter le rendement à cause de sa faible teneur en azote et en phosphore entraîne une mauvaise la biomasse végétale chez le ray-grass (*Lolium perenne* L. var. Cadix) (Karami et al., 2011).

Dans une étude au laboratoire où le biochar a été appliqué sans fumier, (Ippolito et al., 2014) ont montré que la dose d'application de 10 % de biochar a considérablement réduit les concentrations de NO_3^- dans le sol. En se fondant sur ces résultats, ils ont conclu que le taux de 10% a eu des effets négatifs excessifs sur la culture et sur la communauté microbienne du sol.

Le biochar seul a montré une influence sur le pH et sur la disponibilité du phosphore assimilable d'où sa diminution remarquable dans les bulbes avec les traitements 10t/ha et 20t/ha, sachant que le pH optimal du navet est de 6-6,8 5 (ITCMI, 2010).

Pour notre essai on a remarqué que le pH du sol a augmenté de 1,0 à 1,4 unité environ, ceci pourrait être sûrement en relation avec l'effet alcalin de notre biochar à cause de sa composition chimique (liée au chaulage du sol). Le pH situe la marge de pH_{eau} entre 5,5 et 6,5 pour de bons sols agricoles.

Selon DeLuca et al., (2009), le pH alcalin des sols serait dû aux cendres et aux groupements carboxyliques contenus dans le biochar qui revient à la nature de la biomasse traitée.

Selon Yuan et al., (2011), l'incorporation d'un biochar à un taux de 10 g/kg sur un sol acide a augmenté le pH du sol.

Une augmentation du pH du sol d'environ 1 unité, par une augmentation du taux d'application du biochar pourrait être due à la présence d'éléments alcalins (Ca^{+2} , Mg^{+2} et Na^{+}) et à la présence d'ions OH^{-} dans le biochar. Une augmentation du pH du sol après l'application de biochar est fréquemment signalée pour de nombreux types de sol (Glaser et al., 2002 ; Xu et al., 2014).

D'autres travaux révèlent en effet que la concentration en phosphore assimilable dans des sols neutres ou basiques est réduite après un apport de biochar, suite à l'augmentation du pH du sol et à l'apport massif de cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) qui favorisent la précipitation du phosphore (Novak et al., 2012 ; Xu et al., 2014 ; Nyami-bonaventure, 2015).

En effet, le rôle prépondérant du phosphore est dans le développement des fruits, aboutissant ainsi à une augmentation dans leurs production (Hossain et al., 2010). Notons que le phosphore est bloqué au pH inférieur à 6 et supérieur à 7.5, il est disponible pour des pH compris entre 6 et 7.5 (Ippolito et al., 2014 ; Houbenet al., 2014 ; Zhang et al., 2010); de plus, lorsque le Ca^{2+} est en excès dans le sol, le relâchement du phosphore est diminué à cause de la formation de phosphates peu solubles (Nelson et al., 2011 ; Foster et al., 2016). Ceci pourrait expliquer les faibles taux de phosphores observés au niveau des tissus du navet obtenus avec les traitements 5,10 et 20t/ha par apport au témoin et à sa faible quantité dans le sol et le biochar. La tendance générale montre une diminution importante du calibre des tubercules (rendement), où il est donc difficile de conclure sur l'effet « fertilisant » du biochar seul chez le navet dans nos conditions.

Dans les systèmes tempérés, des essais sur le terrain sans fertilisation en phosphore, ont montré que le biochar de pin a diminué le phosphore assimilable du sol, cette diminution a été attribuée à l'alcalinisation du sol (Nelson et al., 2011). Selon Laird et al., (2010) ; Foster et al., (2016), la fixation du phosphore par le calcium et aussi son adsorption sur les surfaces de biochar l'ont rendu moins disponible pour la plante.

Selon Houben, et al., (2014), une augmentation de la biodisponibilité du phosphore dans le traitement Biochar de bois à 3 % dans un sol acide semble avoir un impact positif sur la dynamique de libération du phosphore, qui pourrait également résulter d'une plus grande activité biologique induite par l'application de ce biochar, notamment des d'enzymes telles que les phosphatases.

En effet, Xu et al., (2014); Foster et al., (2016); Ige et al.,(2005), ont démontré qu'il y avait une diminution significative de l'activité de la phosphatase chez le maïs, où ils ont émis l'hypothèse que le biochar de pin a interagit avec les signaux de production de cette enzyme ils ont rapporté que l'effet du biochar sur l'adsorption du phosphore est hautement influencé par le pH du sol; en effet, à un pH autour de 7 et 7.5, le phosphore est fixé par le calcium et devient moins disponible surtout quand le calcium est en excès dans le sol, son relâchement est diminué à cause de la formation de phosphates peu solubles (ponts bi et tricalciques). Ainsi, la fixation de phosphore dans les sols amendés en

biochar peut donc être expliquée par leur fort contenu en calcium. L'augmentation du pH est cohérente à l'effet chaulant habituellement reporté pour le biochar (Houben et al., 2013) qui résulte de la dissolution d'oxydes, hydroxydes et carbonates de métaux alcalins et alcalino-terreux (CaO, CaCO₃) associés au biochar. Nos résultats rejoignent ceux obtenus par d'autres études récentes qui mettent en évidence le rôle prépondérant joué par l'alcalinisation du sol (Houbenet al., 2014).

Concernant le carbone organique, il augmente de manière significative avec un amendement de biochar 10 et 20t/ha par rapport au fumier et au témoin confirmant son potentiel de séquestration. Ces résultats rejoignent ceux de (Adekiyaa et al., 2019; Foster et al., 2016). Malgré qu'il soit récalcitrant à la décomposition microbienne, il garantit une fertilité de sol (Sohi, 2012 ; Steiner et al., 2007 ; Zhang et al., 2014). Selon Steinbeiss et al., (2009), la nature ou la composition du biochar a une réelle influence sur les pertes du carbone organique des sols, sa mesure permet de suivre son évolution avec les différents amendements dans les différents types de sols.

Les recherches ont montré que l'application du biochar au sol peut améliorer la capacité d'échange cationique (CEC) des sols de laquelle découle une réduction du lessivage des nutriments et donc l'amélioration de leur disponibilité (Lehmann et al., 2006; Liang et al., 2006). En effet, le biochar est de structure poreuse avec une grande surface d'échange, de charge superficielle négative lui conférant ainsi une grande capacité d'échange cationique du sol pour une bonne rétention des nutriments (Zhang et al., 2014). Cette CEC augmenterait probablement au fil du temps en raison du vieillissement et l'incubation du biochar dans le sol, en raison de l'oxydation de ses surfaces et/ou adsorption d'acides organiques (Spokas et Reicosky, 2009).

Tout comme la fraction colloïdale chimiquement active des sols, avec le temps il peut commencer à montrer une plus grande surface de charge et peuvent donc augmenter la CEC des sols (Laird et al., 2010). Lehmann et al (2003) ont constaté que la capacité d'échange cationique (CEC) des sols riche en biochar augmentait de façon proportionnelle avec l'augmentation du taux de carbone organique (Woolf, 2008).

Concernant la comparaison entre les traitements, les résultats ont montré une amélioration de la CEC par rapport au témoin surtout avec le traitement 10 et 20t/ha; qui augmente avec le taux de matière organique. La très faible CEC de notre sol est une indication qu'il contient de faibles réserves en éléments nutritifs; qui pourrait être lié à la minéralogie du sol dont la fraction argileuse très faible (Liang et al., 2006 ; Major et al., 2012) et aussi à la faible teneur en matière organique.

Pour le potassium les pertes de cet élément par lessivage semble être moins importantes en présence de biochar par rapport au témoin (Laurin-Lancôt, 2015) à cause de sa présence dans les tissus du navet.

L'ajout de biochar seul n'a pas favorisé la croissance des plants de navet qui étaient chétifs, bien au contraire on a constaté que l'ajout de biochar au sol même pour une courte période a eu un impact négatif surtout avec les doses 10 et 20t/ha par rapport au contrôle et aux autres traitements.

3.2.2. Effet de l'apport du fumier de bovin seul :

L'apport du fumier au sol a sensiblement favorisé la qualité des fruits dans les traitements amendés en fumier seul et en mélange avec le biochar surtout pour le traitement 5t/ha par rapport au témoin et aux reste des traitements. Ce résultat peut s'expliquer par une meilleure activité biologique du sol due à un pH idéal pour une bonne minéralisation de la matière organique permettant ainsi une meilleure disponibilité des éléments minéraux pour le navet d'où une qualité du fruit acceptable contribuant à des rendements satisfaisants (Adekiyaa et al., 2019 ; Biederman et al., 2017). Nos résultats rejoins ceux obtenus par plusieurs travaux. Aussi Steiner et al (2007) ont étudié l'effet du fumier de volaille et le biochar de bois sur un ferralsol amazonien, ils ont démontré que le rendement des parcelles ne recevant que du fumier de volaille été plus élevé que ceux qui contiennent du charbon de bois chez le Maïs (Sohiet al., 2010).

D'après Rahman et al., (2020), l'ajout à long terme du fumier de bovin ou des résidus de culture n'a pas montré une augmentation importante du pH du sol par rapport au témoin. Bien que le fumier seul n'ait pas augmenté le carbone organique et la CEC du sol comme le biochar, seulement ses propriétés connus par sa richesse en éléments minéraux avec un pH idéal ont suffi pour donner les meilleurs résultats dans l'amélioration du rendement du navet. En effet, après l'ajout du fumier, les différents paramètres de croissance étudiés ont montré des augmentions significatives qui ont révélées les plus hautes performances. Notre étude rejoint ceux de (Foster et al., 2016; Ippolito et al., 2016).

Le poids moyen et le diamètre des différentes cultures ont augmenté avec l'ajout de plus de carbone organique dans le sol. Dans les régions climatiques tropicales et subtropicales, La température élevée du sol et de l'air, associée à une forte teneur en humidité, favorise la prolifération des microorganismes, la décomposition de différents amendements organiques comme le compost, le fumier, les résidus de culture...etc ajoutés aux sols, d'où la baisse rapide de la teneur en matière organique au niveau du sol (Foster et al., 2016).

3.2.3. Effet de l'apport du mélange du fumier de bovin et du biochar de bois :

Les résultats de cet essai rejoignent ceux obtenus par (Ippolito et al., 2016), où l'application conjointe du mélange biochar-fumier sur un sol calcaire à des doses différentes a donné des effets bénéfiques sur les propriétés du sol. L'application du biochar et du fumier à des doses de 22,4 et 42 t/ha respectivement en plein champs a noté une diminution de la teneur en azote du sol au cours de la première année à pH alcalin (Ippolito et al., 2016). Selon (Lentz et Ippolito, 2012), au fil du temps le NO_3^- du sol augmente avec tous les taux de biochar appliqués lorsqu'il est mélangé avec 2% de fumier, probablement à cause de la minéralisation et nitrification du fumier.

Selon Ngo et al., (2013), le mélange du fumier de buffle, compost et lombricompost avec le biochar de bois a conduit à une protection de ces matières organiques contre l'oxydation et a modifié leur sensibilité à la dégradation rapide, ce qui suggère que le biochar pourrait augmenter le potentiel de séquestration du carbone du compost, du lombricompost et le fumier, lorsqu'ils sont appliqués en

mélange ce qui pourrait probablement expliqués l'obtention des résultats meilleurs avec les traitements mélanges (biochar*fumier) pour les paramètres de rendements et physico-chimiques du sol pour les deux essais.

Le taux de matière organique le plus élevé obtenu est de 1.86% avec le traitement B20°F en plein champs et en pots. Bien que notre sol soit pauvre en matière organique et après les apports en matières organiques faites, nos résultats restent faibles en les comparants à d'autres travaux. Ceci pourrait peut-être dû à la récalcitrance du biochar (Lehmann et al., 2003), ou peut être lié à la méthode d'analyse utilisée car selon (Blanc, 2013); il se peut que la méthode par calcination détecte environ 70 % de matière organique dans un biochar pur alors que la méthode au dichromate de potassium seulement 6 %; de plus, le dichromate de potassium réagit plus avec les fines particules de biochar. Ceci est certainement lié à la surface d'attaque beaucoup plus grande pour les particules fines que pour les grosses. Alors qu'avec la méthode de calcination, les grosses particules ont un taux de matière organique plus élevé que les particules fines; les analyses de matière organique sont donc biaisées pour les échantillons contenant du biochar.

Il y avait une augmentation du taux de potassium dans nos navets à la suite de l'application de biochar et du fumier et encore mieux avec le mélange des deux par rapport au témoin, ceci pourrait être liées à la présence du potassium dans les deux amendements et dans notre sol et cela pratiquement pour tous les traitements étudiés pour les deux essais. Ce qui pourrait être s'expliquer par le fait que l'ajout du fumier au biochar peut augmenter l'oxydation de la surface de ce dernier dans les conditions favorables (humidité suffisante et température favorable), pour libérer le potassium existant et de le mettre à la disposition du navet (Adekiyaa, et al., 2019; Biederman et al., 2017).

Les diminutions en éléments minéraux observés chez le témoin sont dues principalement à la réduction de la teneur en carbone du sol; Il est à signaler que la CEC est liée aussi à la présence des colloïdes minéraux (argiles) et organiques dans le sol. Pour cela, la matière organique a un lien direct avec la CEC du sol; ceci a été mis en évidence par plusieurs auteurs (Atkinson et al., 2010 ; Laird et al., 2010 ; Lehman et al., 2006 ; Zhang et al., 2010 ; Nyami-bonaventure, 2015).

Dans l'ensemble, l'application du biochar seul ou bien mélanger au fumier a eu une influence négative sur le rendement (tubercules chétifs à faible poids) du navet surtout à des doses élevés de 10 et 20t/ha, cela pourrait être expliquer par sa nature (pH élevé, pauvre en phosphore et en azote) nécessaire au développement des racines, sachant que le navet préfère les sols humifère, légèrement acide ou neutre avec un pH optimal entre 6-6,8, il tolère difficilement les sols alcalins ce qui est le cas de la majorité des sols des régions tempérées (Lentz et Ippolito, 2012).

La faible disponibilité du phosphore avec l'application de biochar décrit une attention plus loin pour toute les raisons citées précédemment (type de sol, choix des cultures et pourquoi pas choix le type de biochar...).

D'après notre étude, l'amélioration de la performance des navets par le fumier était attribuée à son pH neutre, à son faible taux de C/N contrairement au biochar où il était élevé et surtout sa richesse en

éléments minéraux disponibles à notre culture qui ont augmenté la taille des tubercules par rapport au témoin et au biochar seul.

Nos résultats rejoignent ceux de (Foster et al., 2016; Ippolito et al., 2016) où ils ont émis l'hypothèse que les taux d'application relativement faibles de biochar ne causerait pas d'effet négatif tandis que les applications excessive de biochar (10 % et plus) provoquerait un effet d'amorçage négatif même si en présence de fumier ceci reste liés à chaque type de culture et sol.

La matière organique des sols est en équilibre dynamique avec des gains et des pertes permanents liés aux aléas climatiques, aux pratiques culturales, aux minéraux du sol etc. La stabilité de la matière organique permet d'augmenter ce stock dans les sols. Cette stabilité est liée à ses composés récalcitrants, à sa complexation avec les minéraux argileux formant les agrégats. Selon Atkinson et al., (2010) ; Siddique et al., (2013), le biochar, élément carboné et réputé pour sa stabilité pourrait améliorer les propriétés physiques du sol, comme décrit dans ce chapitre ci-dessus.

3.3. Discussion des résultats de l'essai en pot sur le sol sableux:

Nos résultats ont démontré qu'il y a une amélioration et une augmentation de la matière organique, CEC et le pH est obtenu avec les traitements ayant reçu le biochar de bois seul ou combiné avec le fumier de bovin par rapport au témoin. L'application de biochar de la citronnelle (*Cymbopogon flexuosus*), a permis d'améliorer remarquablement la teneur en carbone du sol, la capacité d'échange cationique suite à l'accessibilité des nutriments à la plante ce qui rejoint nos résultats (Sahaa et al., 2019).

D'après Nguyen et al., (2009), le biochar disparaît graduellement en se minéralisant en CO₂. Le taux de carbone qui subsiste dans les sols dépend essentiellement de la nature du biochar, du type de sols, et des conditions climatiques (Steinbeiss et al., 2009). La cinétique du carbone dans le sol a démontré que sa résidence est d'abord rapide puis lente, elle estimée de l'ordre du millénaire. Dans une étude faite sur deux années de végétation dans un sol contenant 20% d'argiles et 1,8 % de carbone, d'après Lentz et Ippolito (2012), le carbone organique total augmente de manière significative soit 0,4 % de TOC de plus avec un amendement de biochar de 22,4 t/ha (sur 20 cm) par rapport au témoin sans amendement (0,8 % de TOC). Selon Glaser et al., (2002) ; Cross et Sohi, (2011) ; le compost seul est minéralisé dans les 5 ans après son incorporation, alors que le temps de séjour moyen du biochar est dans la fourchette du millénaire.

Clements et al., (2015), affirme que les pertes en carbone ont été les plus élevées sur les sols amendés par les fientes de volailles (- 27%) et par le compost (- 27%), suivies par les sols ayant reçu de la litière forestière (- 26%) puis de la parcelle témoin (- 25%), alors que les parcelles ayant reçu du charbon de bois n'ont perdu que - 8 % de leur carbone.

La stabilité et la résistance du biochar contre l'oxydation biotique et abiotique est très variable en raison de la diversité des sources de matériaux originaux et les procédures de production (Schmidt et al., 2014). En effet, le processus d'oxydation du biochar dans les sols reste encore mal connu, et on

ne sait que peu de choses sur les interactions existantes. D'après Liang et al., (2008), la minéralisation du carbone dans les sols à texture sableuse est plus importante par rapport à un sol argileux (la teneur en argile peut protéger physiquement la matière organique et empêche sa minéralisation rapide, les petits pores des micro-agrégats peuvent physiquement piéger et confiner et les microorganismes et les rendre moins active. Ils ont constaté que l'application de compost (source organique) et de biochar, seul ou en mélange, augmentait la teneur en carbone organique du sol par rapport aux sols non amendés, ce qui indique que leurs applications combinés peuvent améliorer l'accumulation et la séquestration du carbone du sol (Prendergast et Saran, 2011).

Le pH du sol est l'une des propriétés chimiques essentielles qui régule la disponibilité des nutriments et la production des cultures. L'ajout à long terme du fumier organique ou les résidus de culture n'ont pas montré une augmentation très importante du pH du sol par rapport au biochar ce qui rejoint nos résultats (Steinbeiss et al., 2009).

Kruger et al. (2009), ont montré que l'addition de biochar issus de Panic érigé à un sol sableux avec une dose de 39 t/ha a fait augmenter le pH du sol de 7,1 à 8,1. En effet, une augmentation du pH du biochar marqué a été enregistrées avec les différentes doses de biochar appliquées au sol surtout pour les traitements B2S et S3B3 de 8,26 et 8,24 respectivement par rapport au témoin.

Avec les traitements ayant reçu le biochar, les valeurs de la CEC, le pH ainsi que la matière organique étaient supérieures à celle des traitements sans apport de biochar notamment le témoin et du fumier seul. Selon Blanc, (2013), la variante compost ne montre pas un meilleur comportement par rapport au témoin. Cette constatation est étonnante car il a été prouvé à mainte reprise l'effet positif du compost ce qui concorde avec nos résultats.

Le biochar frais peut avoir des valeurs de CEC relativement faibles, mais elle augmente avec l'incubation du biochar dans les environnements du sol en raison de l'oxydation de la surface de biochar et / ou adsorption d'acides organiques par le biochar (Laird et al., 2010).

La CEC élevée du biochar fait de celui-ci un excellent support d'éléments nutritifs; ces éléments nutritifs absorbés par le biochar font à leur tour que les microorganismes trouvent des espaces de vie idéaux dans et autour du biochar, qui permet d'accroître la potentialité de symbioses entre microorganismes et racines des plantes d'où une meilleure nutrition pour la plante. La CEC la plus élevée a été trouvée dans les traitements combinés biochar-fumier (S2F2B2). Ces derniers fournissent tous deux une quantité relativement plus élevée de cations basiques et augmenter la CEC dans l'ensemble, le biochar ou le fumier, appliqués seuls ou en combinaison, ont augmenté aussi la CEC. Le degré d'humification des amendements organiques est donc un déterminant primordial de la CEC (Blanc, 2013).

Le biochar a le potentiel d'augmenter la CEC du sol en raison de sa nature hautement poreuse et de sa surface d'échange élevée, ce qui augmente sa capacité de sorption en surface et sa saturation en ions basique réduisant ainsi leurs lessivage, offrant une meilleure efficacité d'utilisation des nutriments par une meilleure gestion des flux des cations les rendant ainsi durablement disponible à la plante ; ces effets sont observés surtout chez les traitements biochar notamment (S3B3). Nos résultats sont en accord avec les conclusions obtenus avec Agegnehua et al., (2016).

D'après Lentz, et Ippolito (2012), le traitement Biochar+Comp a augmenté le taux de COS et la CEC de 23-27% et 20-24% respectivement avec Holetta et 26-34% et 19-23% respectivement avec Robgebeya par rapport au témoin. En outre, Le pH du sol est passé de la valeur initiale de 5,0 à 5,6 avec Holetta et de 4,8 à 5,4 avec Robgebeya.

La traitement B3S3 a diminué très significativement la concentration en phosphore dans les tissus des navets par rapport au témoin et aux autres traitements, ces résultats concordent avec ceux obtenus dans les sols amendés en biochar (Graber et al., 2010) ainsi qu'avec ceux obtenus dans notre essai de plein champs (chapitre 2). Le pH élevé du biochar semblent indiquer que la faible disponibilité du phosphore en serait causée par une précipitation de cet élément sous la présence de carbonates expliquant ainsi la faible concentration du phosphore dans les tissus des plants de tomate et de poivron. Ainsi, une dose plus élevée de 15% de biochar fortement alcalin serait à éviter pour ne pas nuire à la croissance de la plante et qu'un pH supérieur à 7,5 dans le sol pourrait mener à des effets négatifs sur les rendements). Laird, et al., (2010), affirme qu'un pH de sol supérieur à 7 peut favoriser la précipitation du phosphore avec le calcium présent dans le milieu et limiter son prélèvement par la plante. les sols amendés en biochar peuvent augmenter des valeurs de pH jusqu'à 1.5 unité de plus par rapport aux contrôles ce qui rejoint nos résultats.

Selon Xu, et al., (2013), un apport suffisant de phosphore stimule la formation et la croissance précoces des racines, contribue en outre à accélérer la maturité. Plusieurs études ont porté sur l'effet du pH élevé du sol sur la désorption du phosphore. Pour les traitements avec le fumier (F3S3), il est clair que l'ajout de matières organiques aux sols peut augmenter la disponibilité du phosphore du sol. Bintay-Hasib, (2014); affirment que les phosphatases jouent un rôle majeur dans la minéralisation du phosphore organique du sol par les micro-organismes pour sa libération à un pH 6-7.

D'après une étude, des doses de biochar (0, 1, 5 et 10 %) ont été appliqués sur un sol sableux. La solubilité et la biodisponibilité du phosphore après l'application de biochar a été négativement affectée suite aux modifications du pH. Des doses de biochar de bois de (4,4% et 11%,) appliqués sur une terre sablonneuse a abouti à une réduction de la disponibles du phosphore. ces résultats rejoignent les notre obtenus sur le navet et qui mérite une attention accrue vu les effets négatifs sur le rendement surtout au niveau des sols neutre à alcalin qui peuvent nuire sérieusement sur la productivité de certaines cultures sensibles à l'élévation du pH du sol (Xu et al., 2013).

Les différents traitements montrent de très faibles taux d'azote au niveau des tissus du navet notamment avec les doses de biochar par rapport au témoin, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées chez les traitements (S3F3) et (S2B2F2), vu la teneur importante du fumier en azote. Il y a déjà un siècle, Breazeale (1906) et Dachnowski (1908), in(Blanc,2013), ont montré qu'il y avait une augmentation prononcée de la croissance des racines après des ajouts du fumier au biochar par rapport au biochar seul dans les régions tempérés.

Préalablement le biochar n'a en général qu'une faible teneur en azote, les nutriments des plantes doivent être fournis par des ajouts autre que le biochar (Glaser et al., 2002). Cet effet est plus prononcé dans un

sol sablonneux (filtrants et pauvre en nutriments) qu'un autre sol. Selon Fischer et Glaser, (2012) ; dans un sol pauvre en azote, à des doses de 10 et 15 t/ha de biochar, le nombre de feuilles, la teneur en chlorophylle du blé dur et le rendement des grains. Ils suggèrent que le biochar peut réduire les rendements dans un sol déficients en azote si aucun engrais azoté supplémentaire n'est pas rajouté.

Les relations causes-effets sur la dynamique des nutriments suite aux apports du biochar à différentes doses au sol restent encore mal comprises, il se pourrait que ces effets peuvent être très spécifiques au type de sol et aux doses ou à la nature du biochar (Semidaa et al., 2019).

Somme toute, les taux en éléments nutritifs (azote, phosphore et potassium) obtenus dans les tissus de nos navets restent nettement inférieurs par rapport aux normes accordés à cette culture.

Les amendements organiques comme le fumier de bovin, augmentent la croissance et l'activité microbiennes du sol ce qui indiquent une relation étroite entre l'activité microbien et la teneur en carbone dans le sol (Bintay-Hasib, 2014). Les doses (B2S) et (S3B3) de biochar seul ont eu un impact très négatif sur les différents paramètres du rendement du navet à savoir le poids frais, la longueur, le diamètre du bulbe par rapport aux traitements du fumier seul, en mélange avec le biochar et au témoin.

La valeur la plus élevée en azote total a été enregistré chez le traitement (S2B2F2), mais qui reste toujours faible par rapport aux normes accordé aux navets. Selon Biswadjit, (2014), ont observé une immobilisation plus importante en azote en présence de biochar, ceci rejoint nos résultats pour les traitements B3S3 et B2S.

Plusieurs études ont démontré que l'application du fumier pouvait améliorer la porosité et le taux d'infiltration de l'eau dans le sol aboutissant à un bon ancrage racinaire en profondeur (Elzobair et al., 2015 ; Huber et Schaub, 2011). D'après Krishnakumar et al., (2005), l'application du fumier de volaille et de bovin a contribué à augmenter la biomasse par rapport à l'application des engrais inorganiques seuls. Ils ont également émis l'hypothèse que l'application de fumier organique augmenterait la population microbienne et la disponibilité des nutriments dans le sol.

Sur un sol sableux-limoneux (boréales) en plein champ, le biochar de bois a été appliqué à des doses 0, 5, 10, 20 et 30 t/ha sur blé de printemps (*Triticum aestivum* L). Le biochar a augmenté la teneur en eau disponible et a réduit la densité apparente, Il a également augmenté les teneurs en K^+ et en carbone organique du sol (Qayyum et al., 2020). Ces résultats concordent avec ceux obtenus dans notre essai.

La densité apparente est un des indicateur de qualité du sol notamment de la porosité du sol (Verheijen et al., 2009). La valeur la plus important a été obtenue chez le témoin suivit des traitements aux fumiers (S3F3 et F2S) et (S2B2F2) et en fin (B2S et S3B3). En effet, plus il y a de vides plus la densité apparente sera faible ce qui est due cas avec les traitements des biochar. selon, (Major et al., 2012) elles ont une moyenne de 0,30 à 0,43 g/cm³ chez le biochar seul. Ce qui explique que le biochar est un matériau très poreux avec 79 à 85 % de porosité. Une autre étude de Yoro et Godo (1990), qui a montré que la densité apparente est d'autant plus importante lorsque le biochar est mélangé avec du fumier par rapport au

biochar seul et au témoin.

Une étude sur l'impact de deux amendements organiques sur la qualité d'un sol agricole très productif des régions tempérées de Clarion avec 2 % de C organique de texture à dominance argileuse. 12, 5 g/kg de fumier de porc séché et broyé et des doses de (0, 5, 10 et 20 g/kg) de biochar de bois ont été incorporés dans les 3 cm supérieurs de sol. La densité apparente du sol a augmenté avec le temps et était significativement plus faible avec les différentes doses de biochar appliquées (Bintay-Hasib, 2014 ; Ly et al., 2017), ces résultats rejoignent les nôtres.

L'apport de biochar aux sols agricoles affecte nettement leurs densités apparentes (Yoro et Godo, 1990) ; Glab et al., 2016), ont montré que l'ajout d'une dose de 20 g/Kg de biochar pyrolysé à 550 °C à un sol de type sableux ou limoneux, a permis d'augmenter la porosité et la réserve d'eau disponible pour la plante de 12 et 29% respectivement.

En termes de ce travail, les résultats des différents travaux obtenus à travers le monde semblent confirmer la complexité des effets des biochars sur les processus physico-chimiques des sols par leurs spécificités (matière première) et leur processus de production. Car il est important de noter que ce n'est pas l'apport de carbone en tant que tel qui est important pour la fertilité des sols, mais plutôt la décomposition de la matière organique qui influe sur la vie du sol et les nutriments nécessaires aux agro écosystèmes pour atteindre l'objectif.

Avec cet essai les plans chétifs à faible poids du navet ont été obtenus surtout à des doses élevées de biochar alors que l'application du fumier seul a montré les meilleures performances; cela pourrait s'expliquer peut être par la nature du biochar appliqué (pH élevé, faible disponibilité de certains éléments principalement le phosphore assimilable nécessaire au développement des racines,); sachant que le navet préfère les sols humifères, légèrement acide à neutre, il tolère difficilement les sols alcalins ce qui est malheureusement le cas de la majorité des sols des régions tempérées (Lentz et Ippolito, 2012).

Il ressort clairement de la présente étude que le biochar a considérablement amélioré les propriétés chimiques du sol surtout ceci rejoint l'avis de la plupart des travaux effectués à travers le monde sur les différents types de sols. Le biochar est plus stable que le fumier et il a une plus grande capacité à retenir les nutriments. Il peut être incorporé surtout dans les sols sableux pour en améliorer sa qualité, ce qui améliore la capacité des plantes à adsorber mieux les nutriments disponibles vu les pertes par lessivage observées chez ces sols sableux. L'effet à long terme du biochar sur toutes ces propriétés du sol et autres doit faire l'objet de recherches plus approfondies avec la maîtrise des pratiques de gestion les plus rentables et la plus respectueuses de l'environnement afin d'améliorer la fertilité des sols et l'amélioration de la production agricole. Ainsi, le biochar par la séquestration du carbone dans les sols des zones arides ou à texture légère va pouvoir maintenir de manière durable un niveau stable en matière organique (FAO, 2017 ; ONU, 2011).



B2S

S2F2B2

T

S3F3

F2S

B3S3

Fig n°61 : Les navets des différents traitements



Traitement : Témoin

Traitement : S2F2B2



Traitement : B3S3

Traitement : B2S



Traitement : S3F3

Traitement : F2S

Fig n° 62: Photos de quelques traitements de l'essai en pot avec le sol sableux

3.4. Discussion globale :

L'apport du biochar seul et en mélange a eu un effet alcalinisant sur le sol en augmentant son pH surtout avec les fortes doses, ceci a entraîné une baisse importante et accru du rendement par rapport au témoin. Selon les résultats de différents travaux cités au niveau de la bibliographie, cette baisse dans le calibre des fruits de navet était attribué à la diminution de la concentration en phosphore dans les tissus de ces plants qui elle-même été rapporté à l'effet chaulant de notre biochar. Par ailleurs, les deux essais ont fait ressortir l'effet positif du biochar sur l'amélioration de certaines propriétés physico-chimiques de ces sols comme la matière organique, la capacité d'échange cationique et la densité apparente.

Ceci nous amène à conclure que le choix des doses de biochar seul ou en mélange avec le fumier ou un autre composé organique doit être impérativement et préalablement choisi en fonction de la culture choisies et du sol existant que ce soit à court ou à moyen terme.

En général avec le biochar, plus le sol est pauvre plus le biochar aura un effet sur le sol. Les sols à texture légère, sableux seront propices aux applications de biochar que les sols à texture lourde. L'interaction entre le biochar, l'argile et la matière organique du sol amène à la formation de micro agrégats au cours du temps (Cheng et al., 2020; Liang et al., 2006), qui contribueront aussi à un changement de porosité. Ainsi, la stabilité de la matière organique permet d'augmenter son stock dans les sols. Cette stabilité est liée à ses composés récalcitrants à sa complexation avec les minéraux argileux (complexe argilo-humique) et formation des agrégats. Il est connu que l'augmentation du carbone organique dans les sols entraîne une amélioration de la majorité des propriétés comme la rétention hydrique et la porosité accentue la résistance du sol aux différentes dégradations (compaction, intempéries, techniques culturales inappropriées... etc). Selon Atkinson et al., (2010), le biochar, élément carboné et réputé pour sa stabilité pourrait améliorer les propriétés physiques du sol avec la formation d'un grand stock d'humus stable à l'intérieur de ces sols qui constituerai probablement la clé de leur productivité.

Il a est toujours recommandé de fractionner les apports d'engrais afin d'éviter leur lessivage et que ceux-ci ne se retrouvent dans les eaux souterraines et rivières. De plus, la réduction du lessivage de l'azote ainsi que l'augmentation de la rétention et de la biodisponibilité du N dans les sols peuvent potentiellement diminuer la demande en fertilisants azotés pour la croissance des cultures.

Le biochar est depuis quelques années à nouveau utilisé pour améliorer des sols agricoles dans divers pays, Une augmentation du taux de matière organique fait suite à l'oxydation lente du biochar. Cet amendement du sol par le biochar améliore la productivité des cultures, principalement en augmentant l'efficacité de l'utilisation des nutriments et la capacité de rétention d'eau. Cependant, les améliorations de la production végétale sont souvent enregistrées dans des sols très dégradés et pauvres en nutriments. Comme les biochars sont produites à partir d'une variété de matières premières, certains contaminants peuvent être présents. Les métaux lourds présents dans le biochar peuvent affecter la croissance des plantes ainsi que les communautés et fonctions microbiennes et fauniques de la rhizosphère. Les fabricants de biochar doivent obtenir une certification attestant que

leurs produits répondent aux normes de qualité de l'International Biochar Initiative (IBI) (propriétés d'utilité de base, évaluation des substances toxiques, analyse avancée et propriétés d'amélioration des sols). Les effets à long terme du biochar sur les fonctions du sol et son devenir dans les différents types de sol nécessitent une attention immédiate.

D'après notre étude, l'amélioration de la performance des navets par le fumier était attribuée à son pH neutre, à son faible taux de C/N contrairement au biochar où il était élevé et surtout sa richesse en éléments minéraux disponibles à notre culture qui ont augmenté la taille des tubercules par rapport au témoin et au biochar seul, ce qui a mené à l'amélioration significative de la qualité et du rendement des navets.

Nos résultats rejoignent ceux de (Foster et al., 2016; Ippolito et al., 2016) où ils ont émis l'hypothèse que les taux d'application relativement faibles de biochar ne causerait pas d'effet négatif tandis que les applications excessive de biochar (10 % en poids et plus) provoquerait un effet d'amorçage négatif même si en présence de fumier ceci reste liés à chaque type de culture et sol.

Cet essai a permis de constater qu'à court terme, l'ajout du biochar de bois et le fumier de bovin seul ou bien en mélange au sol a contribué à améliorer certains paramètres du sol comme la CEC et la matière organique.

Bien que le biochar ait plusieurs avantages à apporter pour notre sol qui peuvent être apprécié chez les légumes à bulbes comme l'amélioration des propriétés physiques du sol qui peuvent avoir un impact direct sur la croissance et le développement de leurs racines à cause du bon développement des racines et l'amélioration de la profondeur de pénétration par sa capacité à réduire le compactage du sol et par l'augmentation de la porosité d'où une meilleure capacité de rétention en eau et des nutriments (Atkinson et al., 2010 ; Glaser et al., 2002). En effet, le nombre de racines de stockage d'asperges a également augmenté avec des ajouts de biochar à la noix de coco dans un sol tropical (Matsubara et al., 2002). De plus, la longueur des racines du riz augmente avec les ajouts de biochar (Noguera et al., 2010) in Lehman et al., 2011), augmentant ainsi la disponibilité et la rétention des éléments nutritifs des plantes et augmentant potentiellement l'efficacité de l'utilisation des nutriments. Il ne sera possible de l'utiliser qu'à des faibles doses pour les cultures de navet en Algérie et dans ces même conditions édapho-climatiques pour éviter les faibles rendements causé par les fortes doses du biochar seul ou en mélange avec le fumier qui étaient néfastes sur les rendements du navet. En effet, l'application du fumier seul a donné les meilleurs résultats pour la production de navet; la combinaison du biochar à 5t/ha semble être la meilleure et la moins néfaste pour le navet par rapport au témoin et à l'apport du biochar seul, fournissant ainsi un effet synergique et d'amorçage positif avec le fumier (Liu et al., 2012). L'idéal est d'essayer peut être de gardé cette dose (5t/ha) pour les caractères physiques offert par le biochar et le la combiner avec différentes doses plus importantes du fumier capable d'enrichir et d'améliorer encore mieux les propriétés chimiques du sol pour s'attendre à des rendements meilleurs du navet dans nos même conditions.

Ces résultats devront être confirmés par des essais multi-locaux à long terme avec un suivi de la dynamique de certains paramètres clés de la fertilité du sol (dans les mêmes parcelles ayant servi aux essais) afin de servir de références à d'autres pays à agro-écologiques analogues.

Conclusion

Conclusion :

Le développement d'une agriculture durable implique l'identification et le développement de nouvelles stratégies permettant de maintenir les rendements à long terme. Le biochar associé au fumier ou autre sources organiques ou inorganique pourraient constituer une des solutions d'avenir envisageable pour la séquestration du carbone organiques dans les sols dégradés. (Lehmann et al., 2006); (Sohi, 2012). En effet, Il s'avère important de mentionner que les effets du biochar sur les sols et les rendements des cultures ne peuvent être généralisés puisqu'ils restent spécifiques au type de biochar utilisé, à la culture, l'itinéraire technique et au type de sol amendé son ajout à différents taux dans les sols conduit à des résultats très variables et son application n'aboutit pas toujours à des augmentations de rendement; l'idéal serait d'établir un taux pour chaque type de sol et pour chaque espèce végétale. Cette variabilité s'explique généralement par les différentes compositions et structures du biochar, mais aussi sur les propriétés du sol (Lehmann, 2007).

Des essais à long terme surtout de pleins champs sont maintenant nécessaires pour élucider pourquoi et comment les effets du biochar sur la productivité des plantes notamment dans les sols contaminés peuvent être variables. D'autres études sont également nécessaires pour étudier les mécanismes impliqués dans les interactions entre le biochar et les autres amendement organique et inorganiques (Spokas et al.,2012 ; Liu et al., 2012 ;Doan, 2015).

La vie du sol s'inscrit dans une logique globale d'agriculture durable. Cet enjeu gagne du terrain; gérer son exploitation selon les principes de l'agriculture de conservation devient un bon moyen d'associer l'écologie et l'agronomie. En fait, l'utilisation du biochar associé à certaines techniques comme le semis direct ou l'utilisation de techniques simplifiées, ...constituent un raisonnement qui s'inscrit dans une logique d'agriculture de pointe mais aussi de préservation de l'environnement. Le réservoir labile ou disponible du carbone dans les sols est vital pour le maintien de l'équilibre biologique des sols et sa fertilité, tandis que les formes récalcitrantes de carbone sont importantes pour le maintien de sa durabilité à long terme dans le sol.

Ainsi, il est probable que dans le futur le biochar sera intégré dans la composition de nouveaux amendements, associé à des résidus organiques provenant d'élevages ou d'industries agroalimentaires. Toutefois, ces associations pourraient diminuer la stabilité des biochars, en apportant à la surface des biochars une source de carbone soluble facilement labile, car Il est important de noter que ce n'est pas l'apport de carbone en tant que tel qui est important pour la fertilité des sols, mais plutôt le suivi de la décomposition de la matière organique et son impact sur l'agro système.

Pour les différents débats et avis prédits à travers le monde sur les effets du biochar, certains sont d'accord pour dire que c'est une solution extraordinaire pour lutter contre le réchauffement climatique et fertiliser les sols, alors que d'autres restent plus prudents en remettant en cause les capacités de

fertilisant du biochar ou sa permanence en tant que réservoir de carbone. Actuellement, le biochar est très peu utilisé en agriculture, car les mécanismes par lesquels il agit au niveau des sols restent pour le moment mal compris. Ceci dit, le biochar suscite de plus en plus l'intérêt de nombreux scientifiques, qui y voient un moyen simple et efficace pour séquestrer du carbone à très long terme, tout en améliorant de manière propre et durable les productions agricoles par rapport aux autres produits chimiques de synthèses habituellement utilisés.

L'objectif est de fournir une base scientifique solide pour l'élaboration des politiques, pour identifier les lacunes dans les connaissances actuelles et pour recommander des recherches supplémentaires concernant l'application du biochar sur les sols. Les biochars sont très variés et peuvent avoir des effets divers sur les cultures la croissance, la production et les propriétés du sol. De nombreux effets ont été démontrés comme étant bénéfiques, c'est-à-dire l'augmentation de la croissance et du rendement, l'adsorption de métaux lourds, de la capacité de rétention d'eau et de la physiologie des plantes. Toutefois, certaines combinaisons des biochars avec certaines cultures ont prouvé qu'ils sont préjudiciables à la production végétale avec certaines doses de biochar qui ont un grand impact sur la croissance et le rendement des cultures. toutefois, il faudrait mener d'avantage de recherches pour fournir de meilleurs aperçus sur les mécanismes d'interaction du biochar avec le système plantes-sol-environnement (Semida et al., 2019).

Nous suggérons en outre qu'une plus grande collaboration entre les chercheurs, les producteurs de biochar et les décideurs politiques est nécessaire pour faire progresser la recherche et l'adoption de cette importante technologie à l'échelle mondiale. Ceci par une connaissance approfondie des propriétés du biochar qui permettra de maximiser ses avantages agro-culturels et environnementales afin d'adapter son utilisation à des besoins spécifiques (Sohi, 2012). Un effort des scientifiques est nécessaire pour garantir une description complète des biocharbons dans les publications scientifiques, ainsi qu'une description minutieuse des sols sur lesquels le biochar est appliqué, ce qui permettra aux décideurs d'adopter une politique rigide d'application pour le biochar. Plusieurs programmes de normalisation ont récemment été lancés pour garantir que les biochars sont définis et caractérisés selon des méthodologies standard. C'est le cas des programmes "*Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil*" et "*Guidelines for biochar production: European Biochar Certificate*". Ces lignes directrices visent à garantir la sécurité du biochar utilisé comme amendement du sol et fournissent des méthodes d'essai pour certains composants physico-chimiques des charbons bio. Un plan d'expérience solide et la sélection de contrôles appropriés sont également nécessaires pour obtenir une compréhension mécaniste de l'impact du biochar sur des processus pédologiques spécifiques. Les études en laboratoire et en serre menées dans des conditions contrôlées sont cruciales pour faire progresser notre compréhension et combler les lacunes dans les connaissances dont les chercheurs ont besoin pour progresser davantage sur le terrain et au niveau des écosystèmes. Le secteur de la gestion des déchets est le plus susceptible de fournir au biochar une marge de profit, Cependant, les aspects sanitaires du biochar la production, comme les émissions de gaz et la charge de polluants dans le biochar doivent

être soigneusement prises en compte lors de l'utilisation de ces matières premières. C'est, en fait, un domaine qui nécessite des recherches plus approfondies.

Références
Bibliographiques

- Acia, 1999. La biologie de *Brassica rapa* L. cahier parallèle à ladirective 94-08, critèred'évaluation du risqe environnemental associé au végétaux à caractères nouveaux. Canadian Food Inspection Agency. 21p
- Adekiyaa, A.O., Agbedeb, T.M ., Aboyejia, C.M., Dunsina, O. & Simeona, V.T. 2019. Effects of biochar and poultry manure on soil characteristics and the yield of radish. *Scientia Horticulturae*. 243, 457–463.
- Agegnehua, G., Bassb, A.M., Nelsona, P.N., Muirheadc, B., Wrightd, G. & Birda, M.I. 2015. Biochar and biochar-compost as soil amendments: Effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 213, 72–85.
- Agegnehua, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., Bird, M.I. 2016. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Science of the Total Environment*. 543, 295–306.
- Agegnehua, G.P., Nelsona, N. & Birda., M.I. 2016. Crop yield, plant nutrient uptake and soil physicochemical properties under organic soil amendments and nitrogen fertilization on Nitisols. *Soil & Tillage Research*. 160, 1–13.
- Agegnehua, G., Srivastava, A.K.&Bird, M. 2017. *The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance. A review. Applied Soil Ecology*, 119, 156-170.
- Aller, M.F. 2016. Biochar properties: Transport, fateand impact. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 46, 1183-1296.
- Alexis, MA ., Rasse, D.P ., Rumpel, C ., Bardoux, G ., Pechot, N ., Schmalzer, P ., Drake, B. & Mariotti, A. 2007. Fire impact on Cand N losses and charcoal production in a scruboak ecosystem. *Biogeochemistry*. 82, 201–216.
- Anonyme, 2019. La clé des Oasis, Badriane : 2^{ème} Colloque internanional : Inventer l'oasis numérique de demain Timimoun, du 19 au 23 octobre 2019. Algérie. <http://www.la-cle-des-oasis.fr>
- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Homma, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. & Horie, T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos . Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*. 111, 81–84
- Astutik, w., Sumiati,S. & Fikrinda, W. 2017 . Residual effect of potassium fertilizer and biochar on growth and yield of maize in the second season. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 4, 881-889.
- Atkinson, C.J ., Fitzgerald, J.D. & Higgs, N.A . 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils. *Plant and Soil*. 337, 1–18.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*. 158, 2282-2287.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Jose, L., Harris, E., Robinson, B .& Sizmur, T. 2011. A review of biochars potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*. 159, 3269-3282.
- Bengtson, G.W. & Cornette, J.J. 1973. Disposal of composted municipal waste in a plantation of young slash pine. Effect on soiland tree. *J. Environ. Qua*, 2, 84-89.
- Biederman , L.A ., Phelps, J., Ross, B.J., Polzin, M. & Harpole , W.S . 2017. Biochar and manure alter few aspects of prairie development. A fie.ld test. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 23, 78–87.

- Binh, T.N. & Lehmann, J. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*. 40, 846–853.
- Bintay-Hasib, S. 2014. Influence of biochar, vermicompost and wheat straw on phosphate sorption in Bjoa and sara soil series course title : project thesis. Course n° : SS-4106. Soil Science Discipline. Khulna University, Khulna, Bangladesh. 198p.
- Biswadjit, M. 2014. Influence of biochar in combination with different rate of nitrogen on the bioavailability of phosphorus, potassium and sulfur in Bajoa soil series. Soil science discipline, Khulna university.
- Blanc, A., 2013. Propriétés physico-chimiques d'un sol amendé en biochar. Thèse de bachelor Genève, Suisse. <https://docplayer.fr>
- Brussaard, L., De Ruiter, P.C. & Brown., G.G. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 121, 233–244.
- Bushnaf, K.M., Puricelli, S., Saponaro, S. & Werner, D. 2011. Effect of biochar on the fate of volatile petroleum hydrocarbons in an aerobic sandy. *Soil Journal of Contaminant Hydrology*. 126, 208–215.
- Cantrell, J.B., Novak, J.M., Archer, D.W., Ippolito, J.A., Collins, H.P., Lima, I.M., Lamb, M.C., Lentz, R.D., Spokas, K.A. & Nichols, K.A. 2012. Biochar A synthesis of its Agronomic impact beyond carbon sequestration: *Journal of Environmental Quality*. 41, X-X.
- Chalhoub. M., 2010. Effet de l'apport de composts sur la dynamique hydrique du sol, la disponibilité de l'azote pour la plante et le lessivage du nitrate : cas d'un sol limoneux cultivé du bassin parisien, Thèse de doctotat. Paris-sud 254p.
- Chan, K.Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. & Joseph, S. 2007. Agronomic values of green waste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* 45, 629–634.
- Chan, K.Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. & Joseph, S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Aust. J. Soil Res.* 46, 437–444
- Chen, H., Yang, X., Wang, H., Sarkar, B., Shaheen, S.M., Gielen, G., Bolan, N., Guo, J., Che, L., Sun, H. & Rinklebe, J. 2020. Animal carcass and wood-derived biochars improved nutrient bioavailability, enzyme activity, and plant growth in metal-phthalic acid ester co-contaminated soils: A trial for reclamation and improvement of degraded soils. *Journal of Environmental Management*. 261, 110246.
- Cimò, G. 2013. Characterization of chemical and physical properties of biochar for energy purposes and environmental restoration. Dottorato di ricerca in "Tecnologie per la Sostenibilità ed il Risanamento Ambientale" Ciclo XXIV. 166p
- Claver, R., 2003. Le sol ; propriétés et fonctions- constitutions et structures, phénomènes et interfaces : France, Agricole Edition.
- Clements, W.H., Stahl, R. & Landis, R. 2015. Ecological Effects of Biochar on the Structure and Function of Stream Benthic Communities. *Environ. Sci. Technol.* 49, 24, 14649–14654.
- Cotrufo, M.F., Wallenstein, M.D., Boot, C.M., Deneff, K. & Paul, E. 2013. The microbial efficiency - matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs from stable soil organic. *Glob. Change Biol.* 19, 988-995.
- Cross, A. & Sohi, S. P. 2011. The priming potential of biochar products in relation to labile carbon contents and soil organic matter status. *Soil Biology & Biochemistry*. 43, 2127-2134.
- Cuinier, C., 1975. Recherche sur la microflore édaphique des terroirs viticoles de Touraine. Application culturale. Thèse de doctorat, Faculté des sciences, Clermont Frrand. France.

- Debodea, N., Ebrahimia, T., D'Hosea, P., Cremeliea, N., Viaenea, B. & Vandecasteelea, B. 2020. Has compost with biochar added during the process added value over biochar or compost to increase disease suppression. *Applied Soil Ecology*. 153, 157.
- DeLuca, T.H., Mackenzie, M.D. & Gundale, M.J. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management. Science and Technology*. Earthscan, London. 251-270 p.
- Dias, B.O., Carlos, S., Higashikawa, F.S., Roig, A.M. & Sánchez-Monedero, A. 2010. Use of biochar as bulking agent for the composting of poultry manure. Effect on organic matter degradation and humification. *Bioresource Technology*. 101, 1239–1246.
- Doan, T.T., Tureaux, T.H., Rumpel, C., Janeau, J.L. & Jouquet, P. 2015. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*. 514, 147–154.
- Dominique, M. 2003. Les légumes dans l'histoire de l'alimentation .3p
- Ducey, T., Novak, J., Sigua, G.C. & Johnson, M.G. 2021. Microbial response to designer biochar and compost treatments for mining impacted soils. *Chemosphere*, xxx, xxx-xxx.
- Duprarque, A. & Rigalle, P. 2011. Composition de matière organique et turn over, rôle et fonction des MO, aces du colloque « gestion de l'état organique des sols» Agrotansfert.
- Durenkamp, M., Luob, Y. & Brookes, P.C. 2010. Impact of black carbon addition to soil on the determination of soil microbial biomass by fumigation extraction. *Soil Biology & Biochemistry*. 42, 2026-2029.
- El-Naggar, A., El-Naggar, A.H., Shaheen, S.M., Sarkar, B., Scott, X., Chang, R.J., Sik, Y. 2019. Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk. *Journal of environmental management*. 241, 23-25.
- Elzobair, K.A., Stromberge, M.E., Ippolito, J. A. & Lentz, R.D. 2015. Contrasting effects of biochar versus manure on soil microbial communities and enzyme activities in an Aridisol. *Chemosphere*, xxx, xxx–xxx.
- FAO, 2005. Utilisation des engrais par culture en Algérie. Service de la gestion des terres et de la nutrition des plantes division de la mise en valeur des terres et des eaux, ONU pour l'alimentation et l'agriculture, Algérie. 3p.
- FAO, 2017. La carte mondiale du carbone organique du sol, Journée mondiale des sols, ITPS. 5p.
- FAO, 2020. <https://www.atlasbig.com/fr-fr/pays-par-la-production-de-carottes-et-de-navets>
- Faucon, M.P., Houben, D., Reynoird, J.P. & Mercadal-Dulaurent, A.M. 2015. Advances and perspectives to improve the phosphorus availability in cropping systems for agroecological phosphorus management. *Advances in agronomy*. 134, 51-79.
- Fidel, R.B., Laird, D.A. & Parkin, T.B. 2017. Impact of Biochar Organic and Inorganic Carbon on Soil CO₂ and N₂O Emissions. *Journal of Environmental Quality*. *Environ. Qual.* 46, 505–513.
- Fischer, D. & Glaser, B. 2012. Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration. *University Halle-Wittenberg, Institute of Agricultural and Nutritional Sciences, Soil Biogeochemistry, Halle, Germany*.
- Foster, E. J., Hansen, Neil., Wallenstein, M., Cotrufo, M. Francesca. 2016. Biochar and manure amendments impact soil nutrients and microbial enzymatic activities in a semi-arid irrigated maize cropping system. *Agriculture Ecosystems and Environment*. 233, 404–414.
- Galinato, S.P., Yoder, J.K. & Granatstein, D. 2011. The economic value of biochar in crop production and carbon sequestration. *Energy Policy*. 39, 6344–6350.

- Cimò.G., 2013.Characterization of chemical and physical properties of biochar for energy purposes and environmental restoration.Thèse de Dottorat "Tecnologie per la Sostenibilità ed il Risanamento Ambientale" Ciclo XXIV Triennio SSD: AGR/13 – Chimica Agraria.
- Giva, G., 2011. Guide des produits organiques utilisables en languedoc-Roussillon. Chambre Agriculture Occitanie, France, 42p.
- Glab, T., Plamowska, T., Zaleski, T. & Gondek. 2016. Effet of biochar application on soil hydrological properties and physical quality of sand soil. *Geoderma*. 281, 1-11.
- Glaser, B., Lehmann, J. & Zech, W .2002.Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal.*Biology and Fertility of Soils*. 35, 219–230.
- Godlewska , P., Sik Ok, Y. & Oleszczuk. P. 2021.The dark side of black gold .Ecotoxicological aspects of biochar and biochar-amended soils.*Journal of Hazardous Materials*.403, 123833.
- Gomez-Eyles, J.L., Sizmur, T., Collins, C.D. & Hodson. M.E. 2011. Effects of biochar and the earthworm *Eisenia fetida* on the bioavailability of polycyclic aromatic hydrocarbons and potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 159, 616-622.
- Graber., E.R. 2010. Biochar impact on development and productivity on pepper and tomato grow in fertigated soilless media. *Plant.Soil*. 337, 481-496.
- Guet, G. 2003. Mémento d'agriculture biologique, 2ème édition. Agridécisions, PARIS.
- Gulaqa, A., Jin, F., Abdourazak, A.M. 2019.Multiple Beneficial Effects of Using Biochar (as a Great Organic Material) on Tolerance and Productivity of Rice under Abiotic Stress.*Journal of modern materials*. 6, 40-51
- Gulaqa, A., Ajmal, M. & Jin, F. 2020.Effects of Biochar Amendment on Soil Problems and Improving Rice Production under Salinity Conditions.*Advanced journal of graduate research*. 7, 45-63.
- Haddad, k. 2018. Etude de la pyrolyse de matériaux biosourcés chimiquement modifiés : Caractérisation des biochars et application agronomique. Thèse de doctorat en chimie des matériaux. INAT de Tunisie. Tunis. 222p.
- Hall.& Keynes, W.M. 2007. Black carbon sequestration as an alternative to bioenergy Malcolm Fowles. Department of Technology Management, UniversityMK7 6AA, UK.
- Hossain, M. K., Strezov, V., Yin, C. K. & Nelson, P. F. 2010. Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Chemosphere*. 78, 1167–1171.
- Houben, D., Evrard.L. & Sonnet, P. 2013. Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in contaminated soil amended with biochar. *Chemosphere*, xxx, xxx–xxx.
- Houben, D., Hardy, B., Faucon, M.P. & Cornelis, J-T. 2014 .Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering*.62, 54-60.
- Houben, D., Hardy, B., Faucon, M.P. & Cornelis, J.T. 2017.Effect of biochar on phosphorus bioavailability in an acidic silt loam soil.*Biotechnology, Agronomy and Society and Environment*. 21, 209-217.
- Huber, G. & Schaub, C. 2011.La fertilité des sols : Importance de la matière organique, chambre d'agriculture, France, 42p.
- Hudson, B.D.1994. Soil organic matter and available water capacity. *J.Soil Water.Conserv*. 49, 89-194

- Ige, D. V., Akinremi, O. O., Flaten, D. N., Ajiboye, B. & Kashem, M. A. 2005. Phosphorus sorption capacity of alkaline Manitoba soils and its relationship to soil properties. *Can. J. Soil Sci.* 85, 417–426.
- Ippolito, J.A., Laird, D.A. & Busscher, W.J. 2012. Environmental benefits of biochar. *J. Environ. Qual.* 41, 967–972.
- Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D. & Dungan, R.S. 2014. Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. *J. Environ.* 43, 681–689.
- Ippolito, J.A., Stromberger, M.E., Lentz, R.D. & Dungan R.S. 2016. Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil. *Chemosphere.* 142, 84–91.
- ITCMI, 2010. Fiches techniques valorisées des cultures maraîchères et Industrielles : La culture du NAVET 5p. Inter itcmi2008@yahoo.fr
- Jatav, H.S., Jahant, H., Kumar, S. & Kumar, V. 2017. Role of biochar in agriculture sector it's application and application. *Internatinal journal of chemical studies.*5(2), 14-18.
- Jindo, K., Suto, K., Matsumoto, K., García, C., Sonoki, T., Sanchez-Monedero, M. 2012. Chemical and biochemical characterisation of biochar-blended composts prepared from poultry manure. *Bioresource Technology.* 110, 396–404.
- Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H. & Murphy, D.V. 2012. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology & Biochemistry.* 45, 113-124.
- Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C. & Cristoph, M. 2011. Biochar and hydrochar effects on greenhouse Gas (carbon dioxide, Nitrous oxide and Methane) Fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality.* 41, 1052-1066. Special section.
- Karami, N., Clementeb, R., Moreno-Jiménez, E., Leppd, N.W. & Beesleya. L. 2011. Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of Hazardous Materials.* 191, 41–48.
- Karer, J., Wimmer, B., Zehetner, F., Kloss, S. & Soja, G. 2013. Biochar application to temperate soil : effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions. *Agricultural and food science.* 22, 390-403.
- Khaldoun, A., Bellah, F. & Djennadi, F. 2001. Développement des fourrages en Algérie dans le cadre d'U PNDA, Actes de l'atelier national sur la stratégie de développement des cultures fourragères en Algérie. ITGC. Algérie. 43p.
- Klappenbach, J.A., Dunbar, J.M. & Schmith, T.M. 2000. rRNA operon copy number reflects ecological strategies of bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 66, 1328-1333.
- Kocsis, T., Kotroczó, Z., Kardos, L. & Biró, B. 2020. Optimization of increasing biochar doses with soil-plant-microbial functioning and nutrient uptake of maize. *Environmental Technology & Innovation.* Xxx, xxxx- xxx.
- Kookana, R.S., Sarmah, A. K., Van Zwieten, L., Krull, E. & Singh. B. 2011. Biochar Application to Soil: Agronomic and Environmental Benefits and Unintended Consequences. *Advances in Agronomy.* 3, 107-112.
- Kruger, C., Granatstein, H., Collins, J., Yoder, J., Garcia-Peerez, M. 2009. Report : Use biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment.
- Kumar, S.A., Liua, T., Chena, H., Pandeyc, A., Zhanga, Z. & Taherzadehb, M.J. 2020. Emerging applications of biochar: Improving pig manure composting and attenuation of heavy metal mobility in mature compost. *Journal of Hazardous Materials.* 389, 122116.

- Kuppusamy, S., Thavaman, P., Megharaj, M., Ravi Naidu, K., 2015. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. DOI: [10.1016/j.envint.2015.10.018](https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.018)
- Kyle, C., Masek, O., Cross, A. & Sohi, S. 2015. Biochar- synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. *GCB bioenergy*. 7, 1161-1175.
- Laird, D.A., Fleming, P.D., Wang, B., Horton, R. & Karlen, D.L. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. 158, 436–442.
- Laird, D.A., Fleming, P., Davis, D.D., Horton, R., Wang, B. & Karlen, D.L. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*. 158, 443–449.
- Lange, S., Allaire, S., Auclair, I. & Bajzak, C. 2018. Propriétés physicochimiques de 43 biochars, centre de recherches sur les matériaux renouvelables. Rapport technique de l'université de Laval et Geca, environnement. CRMR. Canada.
- Latati, M., Bargaz, A., Belarbi, B., Lazali, M., Benlahrech, S., Tellah, S., Kaci, G., Drevon, J.J. & Ounane, S.M. 2016. The intercropping common bean with maize improves the rhizobial efficiency, resource use and grain yield under low phosphorus availability. *Eur. J. Agron.* 72, 80–90.
- Laurin-Lanctôt, S. 2015. Effet de l'amendement en biochar des sols biologiques pour une culture de tomate sous serre. Rétenion en nutriments, activité biologique et régie de fertilisation. Université de Québec, Canada. 126p.
- Leclerc, B. 2001. Guide des matières organiques ; (eds) guide technique de l'ITAB, 238p.
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V. & Wiese, L. 2017. Carbone organique du sol, une richesse invisible. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome. 67p
- Lehmann, J., Silva, J.J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. & Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil*. 249, 343–357.
- Lehmann, J., Gaunt, J. & Rondon, M. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 11, 403-427.
- Lehmann, J. 2007. A handful of carbon. *Nature*. 447, 143-144.
- Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J., Masiello, C.A., Hockaday, W.C. & Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1812–1836.
- Lehmann, J. & Kleber, M. 2015. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 528, 60-68.
- Lentz, R.D. & Ippolito, J.A. 2012. Biochar and manure affects calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *J. Environ. Qual.* 41, 1033–1043.
- Lentz, R.D., Ippolito, J.A. & Spokas, K.A. 2014. Biochar and Manure Effects on Net Nitrogen Mineralization and Greenhouse Gas Emissions from Calcareous Soil under Corn. *Soil Biology & Biochemistry*. 78, 1641-1655.
- Levesque, V. 2017. Amendement en biochars, Effets sur l'activité et la structure des microorganismes et sur les rendements de la tomate et du poivron sous serre. Thèse de doctorat en microbiologie agroalimentaire. Université de Laval, Québec, Canada. 232p.
- Li, J., Chen, F., Jia, S., Wang, Z., Zuo, Q. & Hongmou, H. 2020. Effect of biochar on Cd and pyrene removal and bacteria communities variations in soils with culturing ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Environmental Pollution*. 265, 114887.
- Li, J., Kwak, J.H., Chang, X.G., Anand, Z. & Chen, J. 2021. Greenhouse Gas Emissions from forest soils reduced by straw Biochar and nitrapyrin Applications. *Land*. 18, 1-11.

Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luiza, F.J., Petersen, J. & Neves, E.G. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*. 70, 1719–1730.

Liang, B., Lehmann J., Solomon, D., Sohi, S., Thies, J., Skjemstad, J.O., Engelhard, M., Neves, E. & Wirick, S. 2008. Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 72, 6069–6078.

Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B. & Glaser, B. 2012. Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystic Cambisol in NE Germany under field conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 698–707.

Liu, J., Qiu, H., Wang, C., Shen, J., Wenzheng, Zhang, J.C., Tang, H. & Wu, J. 2020. Effects of biochar amendment on greenhouse gas emission in two paddy soils with different textures. *Paddy and Water Environment*. DOI: [10.1007/s10333-020-00821-8](https://doi.org/10.1007/s10333-020-00821-8).

Locatelli, A. 2013. Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effets des facteurs pédo-climatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols. Thèse de doctorat en écologie, sciences de la vie microbienne. Université de Bourgogne. France. 144p

Ly, A., Bouthier, A. & Cousin, I. 2017. Estimer la masse volumique apparente des sols à partir de caractéristiques du sol couramment mesurées. Grande culture, GCHP 2 E. 4p

Madi, N. 2012. La matière organique en Algérie. Institut National des Sols de l'irrigation et du Drainage, INSID, Algérie. 8p.

Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J. & Lehmann, J. 2012. Nutrient leaching in a Colombian savanna Oxisol amended with biochar. *J. Environ. Qual.* 41, 1076–1086.

Major, J. 2015. Le biochar comme amendement du sol au Québec : résultats agronomiques de quatre ans d'essais terrain. Québec, Canada JOB 1R0.4p

Manzano, R., Diqattro, S., Roggero, P.P., Pinna, M.V., Garau, G. & Castaldi, P. 2020. Addition of softwood biochar to contaminated soils decreases the mobility, leachability and bioaccessibility of potentially toxic elements. *Science of the Total Environment*. 739, 139946.

Masmoudi, A. 2012. Etude de certains paramètres de durabilité des systèmes de production céréaliculture élevage dans le contexte de l'intégration des techniques de l'agriculture de conservation. Thèse Magistère. Université Ferhat Abbas Sétif. 189p

Matsubara, Y., Hasegawa, N. & Fukui, H. 2002. Incidence of Fusarium roots rot in Asparagus seedling affected with Arbuscular Mycorrhizal Fungus as affected by several soil amendment. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 71, 370-374.

Mensah, A K. & Frimpong, K. A. 2018. Biochar and/or Compost Applications Improve Soil Properties, Growth, and Yield of Maize Grown in Acidic Rainforest and Coastal Savannah Soils in Ghana. *International Journal of Agronomy*. XXX, XXX-XXX.

Mondal, B., 2014. Influence of biochar in combination with different rates of nitrogen on the rates of the bioavailability of phosphorus, potassium and sulfur in Bajoa soil series. Thèse en soil science, Khulna University, Bangladesh. 183p

Munroe, J., Brown, C., Lauzon, J., O'Halloran, I., Bruulsema, T. & Cowan, D. 2018. Manuel sur la fertilité du sol. L'ontario, n° 611F, 3^{ème} Ed. 236p.

Mustin, M. 2001. LE COMPOST gestion de la matière organique. Opaba/Iful, 2001 – Guide technique et pratique du compostage. ITADA/Opaba/Iful., PARIS.

Nelson, N.O., Agudelo, S.C., Yuan, W. & Gan, J. 2011. Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils. *Soil Science*. 176, 218-226/ doi:<http://dx.doi.org/10.1097/SS.0b013e3182171eac>.

- Ngo, P.T., Rumpel, C., Ngo, Q.A., Alexis, M., Vargas, G.V.M., Dang, D.K. & Jouquet, P. 2013. Biological and chemical reactivity and phosphorus forms of buffalo manure compost, vermicompost and their mixture with biochar. *Bioresource Technology* .148, 401–407.
- Ngo, P.T. 2014. Effets des amendements organiques exogènes sur la composition de la matière organique et le stockage du carbone d'un sol dégradé par l'érosion dans le nord du Vietnam. Thèse de doctorat en science de l'environnement: université de la sorbonne, UPMC, Paris.106p.
- Nguyen, B.T. & Lehmann, J. 2009. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*. 40, 846–853.
- Novak, J.M., Busscher, W.J., Watts, D.W., Amonette, J.E., Ippolito, J.A., Lima, I.M., Gaskin, J., Das, K.C., Steiner, C., Ahmedna, M., Rehran, D. & Schomberg, H. 2012. Biochars impact on soil moisture storage in an Ultisol and two Aridisols. *Soil Sci.* 177, 310–320.
- Novak, J.M., Cantrell, K.B., Watts, D.W., Busscher, W.J. & Johnson, M.G. 2013. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. *J Soils Sediments*. DOI 10.1007/s11368-013-0680-8.
- Novak, J.M., Cantrell, K.B., Watts, D.W., Busscher, W.J. & Johnson, M.G. 2014. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. *Soils sediments*. 14, 330–343.
- Nyami-bonaventure, L. 2015. Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols sableux et acides de kinshasa (RDC) par l'usage de charbon de bois, de la biomasse végétale et des engrais minéraux. Thèse de doctorat en aménagement et gestion des forêts et territoires tropicaux (Université de Liège).191p.
- Oladele, S.O., Adeyemob, A.J. & Awodunb.M.A. 2019. Influence of rice husk biochar and inorganic fertilizer on soil nutrients availability and rain-fed rice yield in two contrasting soils. *Geoderma*. 336, 1–11.
- ONU, 2011. Paix, dignité et égalité sur une planète saine. <https://www.un.org/fr/sections/issues-depth/population/index.html>
- Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Striger, L. 2008. Assessment peatlands, biodiversity and climate change. Global environment center and wetlands international. 179p.
- Petit, J. & Jobin, P. 2005. La fertilisation organique des cultures, Les bases. Fédération d'agriculture biologique du Québec, LONGUEUIL. Canada.52p.
- Prendergast, M.M.T. & Saran, M.D.P. 2011. Localisation of nitrate in the rhizosphere of biochar-amended soils. *Soil Biology & Biochemistry* .43, 2243-2246.
- Qayyum, M. F., Ghulam, H., Raza, M. A., Kareem, A., Mohamed, S.H, Rizwan, M.M., El-Sheikh, A., Alyemeni, M. N. & Shafaqat, A. 2020. Straw-based biochar mediated potassium availability and increased growth and yield of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Journal of Saudi Chemical Society*.xxx, xxx–xxx.
- Rahman, M. M., Alam, M.S., Kamal, H. A., Mashuk, M. Z., Datta, R. & Meena, R.S. 2020. Biochar and Organic Amendments for Sustainable Soil Carbon and Soil Health. R. Datta et al. (eds.), Carbon and Nitrogen Cycling in Soil.
- Rovica, R., Rosenani, A., Che, F.I., Siti, H.A. & Chin., T. 2018. Biochar-compost mixture as amendment for improvement of polybag-growing media and oil palm seedlings at main nursery stage. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 7, 11–23.

- Sahaa, A., Basaka, B.B., Gajbhiyea, N.A., Kalariyaa., K.A. & Manivel., P. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andropogon paniculata* and soil health. *Industrial Crops & Products*. 23,140- 160.
- Salducci , X. 2011. Diagnostique de la fertilité biologique du sol et gestion de la matière organique : concepts, méthodes, applications....., une nouvelle génération d'analyses présentation celesta-lab au groupe technique MO des chambre d'agriculture du LR. 96p.
- Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Hommaa, K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. & Horie, T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*.111, 81–84.
- Sanchez-Garcia, M ., Albuquerque, J.A ., Sanchez-Monedero, M.A., Roig, A. & Cayuela, M.L. 2015. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances N mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. *Bioresour. Technol.* 192, 272–279.
- Sani, M.N.H., Nasir, H.M., Uddain, H.J. & Subramaniam, S. 2020. Impact of application of *Trichoderma* and biochar on growth, productivity and nutritional quality of tomato under reduced N-P-K fertilization. *Annals of Agricultural Sciences*, 65, 107–115.
- Schaeffer, A., Nannipieri, P., Kastner, M., Schmidt, B. & Botterweck, J. 2015. From humic substances to soil organic matter – microbial contributions. *J. Soils .Sediments*, 15.1865-1881.
- Scheda, U. 2015. L'importance de la matière organique du sol. The importance of soil organic matter. ENG.02. 18p.
- Schmidt, P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M.W.H., Mackie, K.A. & Abiven, H. 2014. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Hans-Agriculture. Ecosystems and Environment*. 191,117–123.
- Selmi, H. 2016. Effet de l'ajout du biochar sur la symbiose tripartite *Ensifer meliloti-Rhizobium irregularis-luzerne (Medicago sativa L)*, sur la production d'inoculum bactérien et envers la lutte aux agents pathogènes. Maîtrise en microbiologie agroalimentaire. Université de Québec, Canada.89p
- Semida, W. M., Beheiry, H.R., Setamou, M., Simpson, C.R., Abd El-Mageed, T. A., Rady, M.M. & Nelson, S.D. 2019. Biochar implications for sustainable agriculture and environment. *A review South African Journal of Botany*.127, 333-347.
- Sharma, I. & Rajwar, G.S. 2016. Research article effect of biochar on nutritional status of soil. *International Journal of Advanced Research*. 4, 988-996.
- Siddique, M.L., Liu, Y., Li, L., Pan, W., Fua, J., Pana, G., Zhenga, J., Zhenga, J., Zhanga, X. & Yua, X. 2013. Effects of amendment of biochar-manure compost in conjunction with pyroligneous solution on soil quality and wheat yield of a salt-stressed cropland from Central China Great Plain. *Field Crops Research*.144,113–118.
- Siedt, M., Schäffer, A., Kilian, E.C., Smith, A., Moritz, N., Martina, R.N., Joost, T. & Dongen, V. 2021. Comparing straw, compost, and biochar regarding their suitability as agricultural soil amendments to affect soil structure, nutrient leaching, microbial communities, and the fate of pesticides. *Science of the Total Environment*. 751,141607.
- Sizemura, T., Wingate, J., Hutchings, T. & Hodson, M.E. 2011. *Lumbricus terrestris* L. does not impact on the remediation efficiency of compost and biochar amendments. *Pedobiologia*.54, 211–216.
- Snapp, S.S., Mafongoya, P.L. & Waddington, S. 1998. Organic matter technologies for integrated nutrient management in smallholder cropping systems of southern Africa. *Agric. Ecosyst. Environ.* 74, 185-200.

- Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E. & Bol, R. 2010. A review of Biochar and its use and function in soil advances. *Agronomy*. 105, 47-82.
- Sohi, S., Krull, E., Lopez-Capel, E. & Bol, R. 2012. Assessment of Biochar's Benefits for the United States of America. Biochar in agricultural and forestry applications in: Biochar from Agricultural and Forestry Residues – A Complimentary Use of "Waste" Biomass. Martin-Luther-University Halle-Wittenberg, Institute of Agricultural and Nutritional Sciences, Soil Biogeochemistry, Halle, Germany.
- Sohi, S. 2012. Carbon storage with benefits. *Science*. 338, 1034–1035.
- Soltner, D. 2003. Les bases de la production végétale, Tome I LE SOL et son amélioration, 23ème édition, Sciences et techniques agricoles, Sainte-Gemmes-Surloire. 93p.
- Spokas, K.A. & Reicosky, D.C. 2009. Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science*. 3, 179–193.
- Steinbeiss, S., Gleixner, G. & Antonietti, M. 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 41, 1301–1310.
- Steiner, C., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Nehls, T., De Macedo, J.L.V., Blum, W.E.H. & Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil*. 291, 275–290.
- Steiner, C. 2010. Assessment of Biochars Benefits for the United States of America Biochar in agricultural and forestry applications in: Biochar from Agricultural and Forestry Residues – A Complimentary Use of "Waste" Biomass.
- Steiner, C., Das, K.S., Melear, N. & Lakly, D. 2010. Reducing nitrogen loss during poultry litter composting using biochar. *J. Environ. Qual.* 39, 1236–1242.
- Tammeorga, P., Simojokib, A., Mäkelä, P., Stoddarda, F., Alakukuc, L. & Heleniusaa, J. 2014. Short-term effects of biochar on soil properties and wheat yield formation with meat bone meal and inorganic fertiliser on a boreal loamy sand. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 191, 108–116.
- Tomczyk, B., Siatecka, A., Jędruchiewicz, K., Sochacka, A., Bogusz, A. & Oleszczuk, P. 2020. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) persistence, bioavailability and toxicity in sewage sludge- or sewage sludge-derived biochar-amended soil. *Science of the Total Environment*. 747, 141123.
- UPOV, 2001. Principes directeurs pour la conduite de l'examen des caractères distinctifs, de l'homogénéité et de la stabilité. Navet (Brassica rapa.L.var rapa.L.). doc n° TG 37/10, Suisse. Genève. 24p
- Wael, M., Semidaa, B., Hamada, R., Beheirya, B., Mamoudou, C.R., Simpsonb, E., Taia, A., El-Mageed, A., Shad, D. & Nelson. B. 2019. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: A review *South African Journal of Botany*. 127, 333-347.
- Wang, H., Pan, X., Liu, Y., Zhang, X. & Xiong, Z. 2012. Effects of biochar amendment in two soils greenhouse gas emissions and crop production. *Plant Soil*. xxx, xxxx.xxx.
- Wang, H., Xiao, K., Yang, J., Yu, Z., Yu, W., Xu, W.Q.Q., Liang, S., Hu, J., Hou, H. & Liu, B. 2020. Phosphorus recovery from the liquid phase of anaerobic digestate using biochar derived from iron-rich sludge: A potential phosphorus fertilizer. *Water Research*. 174, 115629.
- Waqas, M., Nizami, A.S., Aburizaiza, A.S., Barakat, M.A. & Ismail, I.M.I. & Rashid, M.I. 2018. Optimization of food waste compost with the use of biochar. *Journal of Environmental Management*. 216, 70-81.
- Whitman, T. & Lehmann, J. 2009. Biochar-one way forward for soil carbon in offset mechanisms in Africa. *Environmental science policy*. 12, 1024-1027.

- Widowati, A., Sumiati, A. & Fikrinda., W. 2017. Residual effect of potassium fertilizer and biochar on growth and yield of maize in the second season Faculty of Agriculture, Tribhuwana Tungga Dewi University, Jl. Telagawarna, Malang 65144, Indonesia. *corresponding author:widwidowati@gmail.c.
- Woolf, D. 2008. Biochar as a Soil Amendment: A Review of the Environmental Implications. Swansea University, School of the Environment and Society.122p.
- Woolf, D., Amonette, J., Street-Perrot, A., Lehmann, J. & Joseph, S. 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change.Nature Communications.1, 56-61 .
- Xiang-Yang, Y., Guang-Guo, Y. & Rai S.K. 2009. Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: A three year reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil .*Chemosphere*. 76, 665–671.
- Xu, G., Weia., L.L., Suna, J.N., Shaoa, H.B. & Changa, S.X. 2013.What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism.*Ecological Engineering*.52, 119– 124.
- Xu, G., Sun, J., Shao, H. & Chang, S.X . 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecol. Eng.* 62, 54-60.
- Xu, G., Jisong, Q., Hong, L., Shikai, L., Yongqiang, T. & Lihong, G. 2020. Biochar addition combined with daily fertigation improves overall soil quality and enhances water-fertilizer productivity of cucumber in alkaline soils of a semi-arid region. *Geoderma*. 363, 114-117.
- Yoro, G. & Godo, G. 1990. Les méthodes de mesure de la densité apparente. Cah.ORSTOM, ser, pedo, XXV, n°4.
- Yu, X., Ying , G.G., Rai S. & Kookana, R.S. 2009. Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil.*Chemosphere*. 76, 665–671.
- Yu, X., Ying, G. & Kookana, R.S. 2010. Enhanced and irreversible sorption of pesticide pyrimethanil by soil amended with biochars. *Journal of Environmental Sciences*. 22, 615–620.
- Yuan, J.H., Xu, R.K., Wang, N. & Li, J.Y. 2011.Amendment of Acid Soils with Crop Residues and Biochars.*Pedosphere*.21, 302–308.
- Yuan, J.H., Xu, R.K. & Zhang, H. 2011. The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource.Technology*. 102, 3488–3497.
- Zhang, W ., Niu, J ., Morales, VL ., Chen, X., Hay, AG., Lehmann, J. & Steenhuis, T.S. 2010.Transport and retention of biochar particles in porous media: effect of pH, ionic strength, and particle size. *Ecohydrology*. 3, 497-508.
- Zhang, J., Lü, F., Shao, L. & He, P. 2014. The use of biochar-amended composting to improve the humification and degradation of sewage sludge.*Bioresour. Technol.* 168, 252–258.
- Zhang, P., Zheng, S., Liu, J., Wang, B., Liu, F. & Yujie, F. 2018. Surface properties of activated sludge-derived biochar determine the facilitating effects on *Geobacter* co-cultures. *Water Research*.142, 441-451.
- Zhang, M., Riaz, M., Liua, B., Xia, H., El-desouki, Z. & Cuncang J. 2020.Twoyear study of biochar: Achieving excellent capability of potassium supply via alter clay mineral composition and potassium-dissolving bacteria activity. *Science of the Total Environment*.717, 137286.

Zang, M., Song, G., Gelardi, D.L., Huang, L., Khan, E., Masek, O., Parikh, S.J. & OK, Y.S. 2020. Evaluating biochar and its modifications for the removal of ammonium, nitrate and phosphate in water. *Water Research*. 186, 116303.

Zhanga, J., Baia, Z., Huang, J., Hussaina, S., Zhaob, F., Zhua, C., Zhua, L., Caoa, X. & Jina, Q. 2019. Biochar alleviated the salt stress of induced saline paddy soil and improved the biochemical characteristics of rice seedlings differing in salt tolerance. *Soil & Tillage Research*. 195, 104372.

Zanutel, M. 2019. Impact à long terme du biochar sur les propriétés physiques et hydrodynamique du sol ainsi que les flux et stocks d'eau en milieux tempérés. Faculté des bioingénieurs, université catholique de Louvain, Belgique. 160p. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:19439>.

Zhaoa, H.Q., Liua, Q., Wang, Z.Y., Chena, H. & Yang, Z.G. 2018. Biochar enhanced *biological nitrobenzene* reduction with a mixed culture in anaerobic systems: Short-term and long-term assessments. *Chemical Engineering Journal*. 351, 912–921.

Zheng, H. 2013. Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil. *Geoderma*. 206, 32–39.

Annexes

Test statistique de l'essai sur terrain :

| Tukey HSD test; variable MO (Spreadsheet) | | | | | |
|---|-------|----------|------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | | |
| Error: Between MS = ,06326, df = 32,000 | | | | | |
| Cell No. | Dose | MO Mean | 1 | 2 | 3 |
| 8 | T | 0,968000 | **** | | |
| 1 | B0,5 | 1,046000 | **** | | |
| 7 | F | 1,074000 | **** | | |
| 2 | BF0,5 | 1,122000 | **** | | **** |
| 3 | B1 | 1,616000 | | **** | **** |
| 5 | B2 | 1,638000 | | **** | |
| 4 | BF1 | 1,734000 | | **** | |
| 6 | BF2 | 1,864000 | | **** | |

| Tukey HSD test; variable azote (Spreadsheet) | | | | | | |
|--|-------|------------|------|------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Error: Between MS = ,00947, df = 32,000 | | | | | | |
| Cell No. | Dose | azote Mean | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | B0,5 | 0,438000 | **** | | | |
| 8 | T | 0,496000 | **** | **** | | |
| 5 | B2 | 0,500000 | **** | **** | | |
| 6 | BF2 | 0,550000 | **** | **** | | |
| 2 | BF0,5 | 0,648000 | | **** | **** | |
| 4 | BF1 | 0,756000 | | | **** | **** |
| 7 | F | 0,812000 | | | **** | **** |
| 3 | B1 | 0,952000 | | | | **** |

| Tukey HSD test; variable K (Spreadsheet2) | | | |
|---|-------|----------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | |
| Error: Between MS = 5278E2, df = 32,000 | | | |
| Cell No. | Dose | K Mean | 1 |
| 1 | B0,5 | 2866,664 | **** |
| 8 | T | 2999,998 | **** |
| 3 | B1 | 3133,330 | **** |
| 5 | B2 | 3266,666 | **** |
| 2 | BF0,5 | 3666,664 | **** |
| 7 | F | 3866,664 | **** |
| 4 | BF1 | 3933,330 | **** |
| 6 | BF2 | 4266,664 | **** |

| Tukey HSD test; variable P (Spreadsheet) | | | | | | | |
|--|-------|---------|------|------|------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | | | | |
| Error: Between MS = 1324,1, df = 32,000 | | | | | | | |
| Cell No. | Dose | P Mean | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 6 | BF2 | 227,266 | **** | | | | |
| 5 | B2 | 233,410 | **** | **** | | | |
| 3 | B1 | 258,380 | **** | **** | **** | | |
| 4 | BF1 | 298,458 | **** | **** | **** | **** | |
| 1 | B0,5 | 302,696 | | **** | **** | **** | |
| 8 | T | 315,248 | | | **** | **** | |
| 2 | BF0,5 | 372,372 | | | | **** | **** |
| 7 | F | 436,224 | | | | | **** |

| Tukey HSD test; variable bulb (Spreadsheet) | | | | | | |
|---|-------|-----------|------|------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Error: Between MS = 157,69, df = 32,000 | | | | | | |
| Cell No. | Dose | bulb Mean | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | B2 | 50,246 | **** | | | |
| 6 | BF2 | 56,520 | **** | **** | | |
| 8 | T | 58,720 | **** | **** | | |
| 1 | B0,5 | 59,004 | **** | **** | | |
| 3 | B1 | 81,760 | | **** | **** | |
| 4 | BF1 | 86,362 | | | **** | |
| 2 | BF0,5 | 97,802 | | | **** | |
| 7 | F | 127,304 | | | | **** |

| Tukey HSD test; variable FEUIL (Spreadsheet) | | | | | |
|--|-------|------------|------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | | |
| Error: Between MS = 26,843, df = 32,000 | | | | | |
| Cell No. | Dose | FEUIL Mean | 1 | 2 | 3 |
| 5 | B2 | 10,5200 | **** | | |
| 8 | T | 11,2000 | **** | | |
| 6 | BF2 | 12,2980 | **** | **** | |
| 1 | B0,5 | 12,4740 | **** | **** | |
| 3 | B1 | 14,4240 | **** | **** | **** |
| 4 | BF1 | 15,6800 | **** | **** | **** |
| 2 | BF0,5 | 22,0780 | | **** | **** |
| 7 | F | 23,1860 | | | **** |

| Tukey HSD test; variable LONG (Spreadsheet1) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,89898, df = 32,000 | | | | | |
|--|-------|-----------|------|------|------|
| Cell No. | Dose | LONG Mean | 1 | 2 | 3 |
| 5 | B2 | 8,83600 | **** | | |
| 1 | B0,5 | 8,96800 | **** | | |
| 8 | T | 9,32400 | **** | | **** |
| 6 | BF2 | 9,37000 | **** | | **** |
| 3 | B1 | 11,12400 | | **** | **** |
| 4 | BF1 | 11,40000 | | **** | |
| 2 | BF0,5 | 11,89200 | | **** | |
| 7 | F | 12,75400 | | **** | |

| Tukey HSD test; variable DIAM (Spreadsheet2) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,19403, df = 32,000 | | | | |
|--|-------|-----------|------|------|
| Cell No. | Dose | DIAM Mean | 1 | 2 |
| 8 | T | 3,89400 | **** | |
| 5 | B2 | 4,08200 | **** | |
| 1 | B0,5 | 4,24000 | **** | |
| 6 | BF2 | 4,27400 | **** | |
| 3 | B1 | 4,41800 | **** | **** |
| 4 | BF1 | 4,47000 | **** | **** |
| 2 | BF0,5 | 4,61600 | **** | **** |
| 7 | F | 5,24200 | | **** |

| Tukey HSD test; variable PH (Spreadsheet2) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00295, df = 32,000 | | | | | | | | |
|--|-------|----------|------|------|------|------|------|------|
| Cell No. | Dose | PH Mean | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 7 | F | 7,310000 | | | **** | | | |
| 8 | T | 7,438000 | | | | **** | | |
| 2 | BF0,5 | 7,610000 | | | | | **** | |
| 1 | B0,5 | 7,736000 | | | | | | **** |
| 4 | BF1 | 8,150000 | **** | | | | | |
| 3 | B1 | 8,166000 | **** | | | | | |
| 6 | BF2 | 8,280000 | | **** | | | | |
| 5 | B2 | 8,288000 | | **** | | | | |

| Tukey HSD test; variable CEC (Spreadsheet) | | | | |
|--|-------|----------|------|------|
| Homogenous Groups, alpha = ,05000 | | | | |
| Error: Between MS = ,18443, df = 32,000 | | | | |
| Cell No. | Dose | CEC Mean | 1 | 2 |
| 1 | B0,5 | 4,03800 | **** | |
| 8 | T | 4,19600 | **** | |
| 2 | BF0,5 | 4,20000 | **** | |
| 7 | F | 4,35000 | **** | |
| 3 | B1 | 5,23600 | | **** |
| 5 | B2 | 5,39200 | | **** |
| 6 | BF2 | 5,53400 | | **** |
| 4 | BF1 | 5,54800 | | **** |

Test statistique de l'essai en pot :

| Test HSD de Tukey ; variable CEC (Feuille de données1) | | | | | |
|--|-------------|---------------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,08793, dl = 32,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | CEC Moyen. | 1 | 2 | |
| 1 | BA | 4,100000 | **** | | |
| 8 | TH | 4,148000 | **** | | |
| 7 | FJ | 4,186000 | **** | | |
| 2 | BFB | 4,242000 | **** | | |
| 3 | BC | 5,208000 | | **** | |
| 4 | BFD | 5,302000 | | **** | |
| 5 | BE | 5,522000 | | **** | |
| 6 | BFF | 5,564000 | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable MO (Feuille de données1) | | | | | | |
|---|-------------|--------------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,03758, dl = 32,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | MO Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 8 | TH | 0,944000 | **** | | | |
| 7 | FJ | 1,108000 | **** | **** | | |
| 1 | BA | 1,114000 | **** | **** | | |
| 2 | BFB | 1,190000 | **** | **** | | |
| 4 | BFD | 1,502000 | | **** | **** | |
| 3 | BC | 1,596000 | | | **** | |
| 5 | BE | 1,894000 | | | **** | **** |
| 6 | BFF | 2,110000 | | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable PH (Feuille de données1) | | | | | | | |
|---|-------------|--------------|------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,00302, dl = 32,000 | | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | PH Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 7 | FJ | 7,314000 | **** | | | | |
| 8 | TH | 7,314000 | **** | | | | |
| 2 | BFB | 7,362000 | **** | | | | |
| 1 | BA | 7,588000 | | | | | **** |
| 4 | BFD | 8,078000 | | **** | | | |
| 3 | BC | 8,138000 | | **** | **** | | |
| 6 | BFF | 8,222000 | | | **** | **** | |
| 5 | BE | 8,256000 | | | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable P (Feuille de données1) | | | | | |
|--|-------------|-------------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 1337,3, dl = 32,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | P Moyen. | 1 | 2 | 3 |
| 6 | BFF | 229,3280 | **** | | |
| 5 | BE | 246,8660 | **** | **** | |
| 2 | BFB | 285,2320 | **** | **** | |
| 3 | BC | 289,6260 | **** | **** | |
| 1 | BA | 293,8920 | **** | **** | |
| 4 | BFD | 301,2900 | **** | **** | |
| 8 | TH | 313,4240 | | **** | |
| 7 | FJ | 448,9980 | | | **** |

Test HSD de Tukey ; variable AZOTE (Feuille de données1)

Groupes Homogènes, alpha = ,05000

| Erreur : MC Inter = ,00424, dl = 32,000 | | | | |
|---|-------------|-----------------|------|------|
| Cellule N° | Traitements | AZOTE Moyen. | 1 | 2 |
| 1 | B0,5 | 0,460000 | **** | |
| 8 | T | 0,494000 | **** | |
| 3 | B1 | 0,504000 | **** | |
| 6 | BF2 | 0,512000 | **** | |
| 5 | B2 | 0,524000 | **** | |
| 2 | BF0,5 | 0,524000 | **** | |
| 4 | BF1 | 0,570000 | **** | |
| 7 | F | 0,860000 | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable kg ps (Feuille de données1) | | | | | |
|--|-------------|-----------------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 1528E2, dl = 32,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | kg ps Moyen. | 1 | 2 | 3 |
| 1 | BA | 2199,998 | **** | | |
| 8 | TH | 2333,332 | **** | | |
| 2 | BFB | 2466,664 | **** | | |
| 5 | BE | 2666,664 | **** | | |
| 4 | BFD | 3599,998 | | **** | |
| 3 | BC | 3599,998 | | **** | |
| 6 | BFF | 3733,330 | | **** | **** |
| 7 | FJ | 4533,330 | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable bulb (Feuille de données1) | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 99,346, dl = 32,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | bulb Moyen. | 1 | 2 | 3 | |
| 5 | BE | 50,29400 | **** | | | |
| 6 | BFF | 50,81800 | **** | | | |
| 8 | TH | 55,71600 | **** | | | |
| 1 | BA | 56,71000 | **** | | | |
| 3 | BC | 69,42800 | **** | **** | | |
| 4 | BFD | 70,48200 | **** | **** | | |
| 2 | BFB | 84,62800 | | **** | **** | |
| 7 | FJ | 99,85400 | | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable FEUIL (Feuille de données1) | | | | | | |
|--|-------------|-----------------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 5,6166, dl = 32,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | FEUIL Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6 | BFF | 6,95800 | **** | | | |
| 5 | BE | 7,26800 | **** | | | |
| 8 | TH | 7,91400 | **** | | **** | |
| 1 | BA | 9,70400 | **** | | **** | **** |
| 4 | BFD | 12,73400 | | **** | **** | **** |
| 3 | BC | 13,17200 | | **** | | **** |
| 7 | FJ | 14,63600 | | **** | | |
| 2 | BFB | 17,01800 | | **** | | |

| Test HSD de Tukey ; variable DIAM (Feuille de données1) | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,09976, dl = 32,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | DIAM Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 6 | BFF | 3,238000 | **** | | | |
| 5 | BE | 3,404000 | | **** | **** | |
| 8 | TH | 3,604000 | **** | **** | **** | |
| 1 | BA | 3,684000 | **** | **** | **** | |
| 2 | BFB | 4,008000 | **** | | **** | |
| 3 | BC | 4,118000 | **** | | | **** |
| 4 | BFD | 4,138000 | **** | | | **** |
| 7 | FJ | 4,744000 | | | | **** |

Test statistique de l'essai sur sol sableux :

| Test HSD de Tukey ; variable CEC (Feuille de données2) | | | | | |
|--|-------------|---------------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,05181, dl = 24,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | CEC Moyen. | 1 | 2 | |
| 4 | B2V | 3,318000 | **** | | |
| 6 | T | 3,428000 | **** | | |
| 2 | F2S | 3,474000 | **** | | |
| 5 | B3S3 | 3,656000 | **** | **** | |
| 1 | F3S3 | 3,666000 | **** | **** | |
| 3 | S2F2B2 | 4,054000 | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable MO (Feuille de données2) | | | | | |
|---|-------------|--------------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,01493, dl = 24,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | MO Moyen. | 1 | 2 | 3 |
| 2 | F2S | 0,850000 | **** | | |
| 6 | T | 0,862000 | **** | **** | |
| 1 | F3S3 | 0,980000 | **** | **** | |
| 4 | B2V | 1,068000 | **** | **** | **** |
| 5 | B3S3 | 1,100000 | | **** | **** |
| 3 | S2F2B2 | 1,260000 | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable PH (Feuille de données2) | | | | | |
|---|-------------|--------------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,00464, dl = 24,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | PH Moyen. | 1 | 2 | 3 |
| 1 | F3S3 | 7,726000 | **** | | |
| 2 | F2S | 7,728000 | **** | | |
| 6 | T | 7,814000 | **** | **** | |
| 3 | S2F2B2 | 7,872000 | | **** | |
| 5 | B3S3 | 8,246000 | | | **** |
| 4 | B2V | 8,266000 | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable P (Feuille de données2) | | | | | | |
|--|-------------|-------------|------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 746,45, dl = 24,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | P Moyen. | 1 | 2 | 3 | |
| 5 | B3S3 | 241,2460 | | | **** | |
| 6 | T | 262,1560 | **** | | **** | |
| 4 | B2V | 284,9900 | **** | **** | **** | |
| 2 | F2S | 304,0860 | **** | **** | | |
| 1 | F3S3 | 312,7080 | **** | **** | | |
| 3 | S2F2B2 | 318,0680 | | **** | | |

| Test HSD de Tukey ; variable Azote (Feuille de donnée) | | | | | | |
|--|-------------|-----------------|------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,00312, dl = 24,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Azote Moyen. | 1 | 2 | 3 | |
| 6 | T | 0,456000 | **** | | | |
| 5 | B3S3 | 0,506000 | **** | **** | | |
| 4 | B2V | 0,508000 | **** | **** | | |
| 2 | F2S | 0,536000 | **** | **** | | |
| 1 | F3S3 | 0,592000 | | **** | **** | |
| 3 | S2F2B2 | 0,666000 | | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable k+/100g ps (Feuille de données2) | | | | | | |
|---|-------------|----------------------|------|------|------|--|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 51852,, dl = 24,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | k+/100g ps Moyen. | 1 | 2 | 3 | |
| 4 | B2V | 1000,000 | **** | | | |
| 6 | T | 1000,000 | **** | | | |
| 5 | B3S3 | 1199,998 | **** | **** | | |
| 2 | F2S | 1466,664 | | **** | | |
| 1 | F3S3 | 2000,000 | | | **** | |
| 3 | S2F2B2 | 2399,998 | | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable Bulb (Feuille de données2) | | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 35,784, dl = 24,000 | | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Bulb Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | B3S3 | 4,23600 | **** | | | | |
| 4 | B2V | 6,26200 | **** | **** | | | |
| 6 | T | 17,44200 | | **** | **** | | |
| 2 | F2S | 26,21200 | | | **** | | |
| 3 | S2F2B2 | 42,17000 | | | | **** | |
| 1 | F3S3 | 54,28200 | | | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable Diam (Feuille de données2) | | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,08247, dl = 24,000 | | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Diam Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 5 | B3S3 | 0,402000 | | | **** | | |
| 4 | B2V | 1,474000 | | | | **** | |
| 6 | T | 2,044000 | | | | | **** |
| 2 | F2S | 2,690000 | **** | | | | |
| 3 | S2F2B2 | 3,224000 | **** | **** | | | |
| 1 | F3S3 | 3,510000 | | **** | | | |

| Test HSD de Tukey ; variable Feuil (Feuille de données2) | | | | | |
|--|-------------|-----------------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | |
| Erreur : MC Inter = 9,2498, dl = 24,000 | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Feuil Moyen. | 1 | 2 | 3 |
| 5 | B3S3 | 2,62400 | **** | | |
| 4 | B2V | 3,95000 | **** | | |
| 6 | T | 4,90200 | **** | **** | |
| 2 | F2S | 6,96200 | **** | **** | |
| 1 | F3S3 | 10,30400 | | **** | **** |
| 3 | S2F2B2 | 14,38400 | | | **** |

| Test HSD de Tukey ; variable Long (Feuille de données2) | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,32063, dl = 24,000 | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Long Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | B3S3 | 2,344000 | **** | | | |
| 4 | B2V | 3,328000 | **** | | | |
| 6 | T | 5,030000 | | | | **** |
| 2 | F2S | 6,822000 | | **** | | |
| 3 | S2F2B2 | 7,496000 | | **** | **** | |
| 1 | F3S3 | 7,932000 | | | **** | |

| Test HSD de Tukey ; variable Densité app (Feuille de donné | | | | | | | |
|--|-------------|-----------------------|------|------|------|------|------|
| Groupes Homogènes, alpha = ,05000 | | | | | | | |
| Erreur : MC Inter = ,00092, dl = 24,000 | | | | | | | |
| Cellule N° | Traitements | Densité app Moyen. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 3 | S2F2B2 | 0,634000 | | **** | | | |
| 5 | B3S3 | 0,722000 | | | **** | | |
| 1 | F3S3 | 0,792000 | **** | | | | |
| 4 | B2V | 0,822000 | **** | | | | |
| 2 | F2S | 0,890000 | | | | **** | |
| 6 | T | 1,094000 | | | | | **** |

