



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche
Scientifique



Université Constantine 1 Frères Mentouri
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

جامعة قسنطينة 1 الإخوة منتوري
كلية علوم الطبيعة والحياة

Département : Biologie végétale/ قسم : بيولوجيا النبات

Mémoire Présenté En Vue De L'obtention Du Diplôme De Master

Domaine: Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Biotechnologies

Spécialité : biotechnologie et génomique végétale

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

Étudier l'impact du biochar sur l'augmentation de la tolérance au stress
salin du blé dur (*Triticum durum* Desf.).

Présenté par : ZEKRI AYA

KHETTIB DJIHENE

Le :29/06/2025

Jury d'évaluation :

Président : MCB. LOUALI Y.

Encadrant : Pr BOUSBAA R.

Examineur : MCB. KHENAOUI A.

Année universitaire 2024 - 2025

Remerciement

Nous commençons par exprimer notre profonde gratitude au **tout-puissant**,
qui nous a accordé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien
cette recherche.

Nos remerciements s'adressent à notre encadrante Madame **Bousbaa Ratiba**,
Nous tenons également à exprimer notre gratitude à l'**ingénieure Sabrina Ait**
Abdelkader dont l'accompagnement et l'expertise ont été particulièrement
précieux dont la réalisation de ce travail

Nos remerciement aussi s'adressent aux membres du jury, madame **Louali**
yamouna, madame **Khenaoui amina** ,

Enfin, nous étendons nos remerciements à **toutes les personnes** qui, de près
ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire. Leur appui moral,
leurs conseils et leurs encouragements ont joué un rôle capital dans la réussite
de ce projet.

Que l'expression de notre plus profonde gratitude leur parvienne.





À nos frères et sœurs, pour leur soutien indéfectible, leur joie de vivre et les précieux moments partagés qui ont allégé le chemin.

À nos amies, compagnons de cette aventure universitaire, pour leur amitié sincère, leurs encouragements et les éclats de rire qui ont ponctué les défis.

À nos professeurs et mentors, qui, par leur savoir et leur passion, ont éclairé ma voie et ont su me pousser à dépasser mes limites.

Enfin, à la terre de mon pays, l'Algérie, source d'inspiration et d'espoir, pour laquelle chaque ligne de ce travail est une promesse de renouveau.

Ce mémoire est le fruit de leur présence et de leur soutien.

Tables Des Matières

Table des matières

Résumé	IX
Abstract	X
المخلص	XI
Liste des tableaux	XII
Liste des figures	XIII
Liste des abréviations	XIV
Introduction : Le Bio-char, un Amendement Prometteur pour la Réhabilitation des Sols Salins	1
Chapitre 01 : Le Bio-char	
1. Origines et évolution du bio-char	2
2. Biochar : définition et concepts clés	3
3. Procédés de production du bio-char	4
4. Fonctions et applications du bio-char	5
4.1 Dans le secteur agricole	5
4.2 Dans le secteur environnemental	6
5. Propriétés fondamentales du bio-char.....	6
5.1 Caractéristiques physiques : structure et texture.....	6
5.2 Caractéristiques chimiques : composition et réactivité.....	7
6. Le bio-char : catalyseur d'impacts positifs en agriculture et environnement.....	8

Tables Des Matières

6.1	Effets biologiques et agronomiques : fertilisation et production.....	8
6.2	Effets physico-chimiques : interactions avec le sol.....	8
6.3	Effets sur la microbiologie du sol : biodiversité et processus.....	9
6.4	Effets sur le développement végétal : croissance et résistance.....	9
7.	Activation du bio-char : procédés et finalités.....	10
7.1	Activation physique.....	10
7.2	Activation chimique.....	10
Chapitre 02 : Lancement de l'expérimentation et les paramètres mesurés		
1.	Objectif de l'expérimentation	11
2.	Installation de l'expérimentation	12
Essai N° 01 : paramètres mesures sur le biochar		
3.	Analyses physico chimiques.....	13
3.1	Mesure de PH.	14
3.2	Mesure de la porosité.	14
3.3	Mesure de la conductivité électrique.	15
3.4	Mesure de la matière organique.	16
3.5	Mesure du phosphore assimilable dans le bio-char:(Méthode de JORET-HEBERT 1955).	17
Essai N° 02 : paramètres mesures sur le blé		
1.	Paramètres physiologiques.....	19
1.1	Mesure de la conductivité électrique.	19

Tables Des Matières

1.2 Teneur en chlorophylle.	20
1.3 Paramètres morphologiques	22
1.4 Teneur en Proline.....	23

Résumé

Le stress abiotique, dont la salinité du sol est une menace majeure pour l'écosystème, a conduit à l'exploration de diverses stratégies d'atténuation. Dans ce contexte, le biochar est reconnu comme un amendement puissant capable de réduire le stress salin sur les cultures. Ainsi, le but de la présente enquête est d'évaluer l'impact du sel (NaCl : 150 mM) et du biochar (BC : 0.5 g kg⁻¹) sur les réponses morphologiques, biochimiques et physiologiques des plantules de **blé dur** (... .. L.). Nos résultats ont révélé tout d'abord une augmentation de la biomasse du **blé dur** en présence de biochar, indiquant le rôle important du biochar dans l'amélioration de la croissance des plantules. En outre, le biochar a atténué le stress oxydatif induit par le sel en augmentant les activités de l'ascorbate peroxydase (APX), de la catalase (CAT) et de la glutathion-S-transférase (GST). De plus, le biochar augmente la teneur en chlorophylle, proline et flavonoïdes dans les plantules de **blé dur** traitées au sel. Dans l'ensemble, on peut conclure que le biochar peut constituer une stratégie utile pour réduire les effets nocifs de la salinité. Cependant, les taux de biochar doivent être utilisés avec précaution dans les sols salins pour améliorer le développement des plantes et réduire la toxicité du stress salin.

Mots clés: biochar , salinité , stress salin

Abstract

The abiotic stress has posed numerous threats to the soil ecosystem, among which is soil salinity. Thus, several strategies are suggested to mitigate this problem. In this context, biochar is known as a powerful amendment capable of alleviating salt stress on crops. Therefore, the purpose of the present investigation is to evaluate the impact of salt (NaCl: 150 mM) and biochar (BC: 0.5 g kg⁻¹) on the morphological, biochemical, and physiological responses of **durum wheat** (*Triticum durum* Desf.) seedlings. Our results first revealed an increase in **durum wheat** biomass in the presence of biochar, indicating the important role of biochar in improving seedling growth. Furthermore, biochar mitigated salt-induced oxidative stress by increasing the activities of ascorbate peroxidase (APX), catalase (CAT), and glutathione-S-transferase (GST). Additionally, biochar increases chlorophyll, proline, and flavonoid content in salt-treated **durum wheat** seedlings. Overall, it can be concluded that biochar can be a useful strategy to reduce the harmful effects of salinity. However, biochar rates must be used cautiously in saline soils to improve plant development and reduce the toxicity of salt stress.

Key words: salinity , biochar, salt stress

الملخص

ولذلك، الجهد الأحيائي اللاحيوي تسبب في العديد من التهديدات لنظام التربة البيئي، ومن بينها ملوحة التربة وفي هذا السياق، يُعرف الفحم الحيوي بأنه مُحسن قوي قادر على اقترحت عدة استراتيجيات للتخفيف من هذه المشكلة: كلوريد الصوديوم)وعليه، فإن الغرض من هذا البحث هو تقييم تأثير الملح. تخفيف إجهاد الملوحة على المحاصيل على الاستجابات المورفولوجية والكيميائية (غرام لكل كيلو غرام 0.5: فحم حيوي) والفحم الحيوي (ملي مولار 150 وقد كشفت نتائجنا أولاً عن زيادة في (*Triticum durum* Desf.) الحيوية والفسولوجية لشتلات القمح الصلب بوجود الفحم الحيوي، مما يشير إلى الدور الهام للفحم الحيوي في تحسين نمو الشتلات الكتلة الحيوية للقمح الصلب علاوة على ذلك، خفف الفحم الحيوي من الإجهاد التأكسدي الناجم عن الملح عن طريق زيادة نشاط إنزيمات أكسيداز بالإضافة إلى ذلك، يزيد الفحم (GST) ترانسفيراز -S-، والغلوتاثيون (CAT)، والكاتالاز (APX) الأسكوربات وبشكل عام، المعالجة بالملح الحيوي من محتوى الكلوروفيل، والبرولين، والفلافونويدات في شتلات القمح الصلب ومع ذلك، يجب. يمكن الاستنتاج أن الفحم الحيوي يمكن أن يشكل استراتيجية مفيدة لتقليل الآثار الضارة للملوحة استخدام معدلات الفحم الحيوي بحذر في التربة الملحية لتحسين نمو النباتات وتقليل سمية إجهاد الملوحة

الكلمات المفتاحية. ملوحة إجهاد حيوي فحم حيوي

Liste Des Tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Teneur en matières azotées (%).....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2: Moyenne de teneur relative en eau (%).....	16
Tableau 3: Resultat de la conductivité électrique.....	18
Tableau 4: Moyenne du teneur en chlorophylle(µg/mL).....	19
Tableau 5: Moyenne poids frais des racines (g).....	20

Liste des figures

Figure 1: Terra preta	3
Figure 2: Calcination des noix de datte par pyrolyse	5
Figure 3: Mise en germination des graines	12
Figure 4: Installation et croissance des plantes	13
Figure 5: Resultat pH	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6: Mesure porosité des substrats	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7: Mesure de la conductivité électrique (us/cm)	14
Figure 8: Bio-char et sol après séchage au four	
Figure 9: Teneur en matière organique	Erreur ! Signet non défini.
Figure 10: Solution obtenu de phosphore	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11: Résultats du phosphore	Erreur ! Signet non défini.
Figure 12: Processus de chlorophylle	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13: Teneur en proline (mg/l)	20

Liste des abréviations

PH : potentiel hydrogène.

N% : Normalité de Hcl.

Msa : Matière sèche de l'échantillon.

MAT : Matière azotée totale.

PE : Prise d'essai.

MO : Matière organique.

TRE : Taux de rétention d'eau.

REP : Répétition.

G : Gramme.

CE : Conductivité électrique.

PT : Poids a turgescence.

PF : Poids frais.

PS : Poids sec.

T : Témoin.

GES : Emission de gaz à effet de serre.

Carte d'information

1- Équipe d'encadrement

Équipe d'encadrement	Spécialité
Encadrant principal : .Bousbaa Ratiba	Biotechnologie et génomique végétale
Co-encadrant : Ait abdelkader Sabrina	Biotechnologie et génomique végétale

Introduction Générale

Le Bio-char un Amendement Prometteur pour la Réhabilitation des Sols Salins

La salinisation des terres agricoles constitue un enjeu majeur en Algérie, particulièrement dans les zones arides et semi-arides où elle compromet sérieusement la production agricole et la durabilité des écosystèmes (Benbrahim *et al.*, 2017). Ce phénomène, accentué par le climat, des pratiques d'irrigation inadéquates et la qualité de l'eau, conduit à une accumulation excessive de sels solubles dans la rhizosphère, engendrant un stress osmotique et ionique néfaste à la croissance et au rendement des cultures (Ouda & Zaki, 2015). Face à cette contrainte pédologique, l'identification et l'application de stratégies d'amendement des sols salins efficaces et adaptées au contexte algérien s'avèrent cruciales pour garantir la sécurité alimentaire et la pérennité des activités agricoles.

Dans ce contexte, le biochar, un matériau carboné microporeux issu de la pyrolyse de diverses biomasses organiques en anaérobie (Lehmann & Joseph, 2009), apparaît comme une solution prometteuse pour l'amélioration des propriétés des sols dégradés, y compris les sols salins (Hossain *et al.*, 2017). Produit localement à partir de résidus agricoles abondants en Algérie (e.g., grignons d'olives, résidus de palmiers dattiers), le biochar présente un intérêt particulier pour la valorisation des ressources locales et son potentiel de séquestration du carbone, contribuant à l'atténuation du changement climatique (Downie *et al.*, 2009).

Les mécanismes par lesquels le biochar peut influencer positivement les sols salins sont multiples, incluant l'amélioration de la structure, de la rétention en eau et de l'aération grâce à sa porosité (Novak *et al.*, 2009), l'influence sur la sorption ionique via ses groupements fonctionnels (Yao *et al.*, 2012), et la modification du pH et la stimulation de l'activité microbienne bénéfique (Thomas *et al.*, 2013).

Bien que des études préliminaires aient suggéré des améliorations avec le biochar dans divers contextes (Akmal *et al.*, 2021), la réponse spécifique des sols salins algériens nécessite une investigation approfondie, tenant compte de leurs caractéristiques

Introduction Générale

pédologiques et des conditions agroclimatiques locales, ainsi que de la variabilité des propriétés du biochar (Mukherjee *et al.*, 2014).

Ce mémoire se propose d'examiner l'effet de l'amendement avec du biochar produit à partir de ressources naturelles sur : Atténuation des sols salins, enrichissement des sols et par conséquent L'amélioration des cultures, modulation de la disponibilité des nutriments et le support de la vie microbienne

Chapitre 01 : Le bio-char

1- Origines et évolution du bio-char

L'histoire du bio-char, riche de millénaires, témoigne d'une utilisation ancestrale dans l'agriculture avant sa redécouverte par la science moderne. Les sols noirs et fertiles de la région amazonienne, appelés "Terra Preta", créés par les populations indigènes il y a 500 à 8000 ans, constituent la preuve la plus significative de cette pratique ancienne (Glaser *et al.*, 2001 ; Lehmann & Joseph, 2009 ; Woods *et al.*, 2009). La richesse de ces sols en matière organique stable, en nutriments et en fragments de charbon de bois a mis en lumière les avantages du biochar et a stimulé la recherche contemporaine.



Figure 1: Terra preta

Au-delà de l'Amazonie, des indices suggèrent une utilisation traditionnelle, bien que moins documentée, du charbon de bois pour améliorer les sols dans d'autres cultures anciennes (Blackwell *et al.*, 2013). Ces pratiques, souvent empiriques, reposaient sur l'observation des effets positifs des résidus de combustion sur la terre.

L'intérêt scientifique actuel pour le biochar a émergé à la fin du XXe et au début du XXIe siècle, inspiré par la fertilité exceptionnelle des Terra Preta (Lehmann, 2007). Les chercheurs ont alors entrepris d'étudier le potentiel du biochar pour améliorer les sols dégradés, séquestrer le carbone et gérer durablement les déchets organiques (Rondon *et al.*,

Chapitre 01 : Le bio-char

2007 ; Downie *et al.*, 2009). L'article de Lehmann (2007) dans la revue *Nature* a joué un rôle clé dans la diffusion de ce concept au sein de la communauté scientifique.

Depuis, la recherche sur le biochar a connu une croissance exponentielle, explorant diverses matières premières, techniques de production (Manyà, 2012) et applications. Ces études se sont étendues à des domaines tels que le traitement des eaux (Yuan *et al.*, 2011), la capture de polluants, la production d'énergie et les matériaux de construction (Enders *et al.*, 2012). Un axe important de l'évolution de la recherche est l'optimisation des propriétés du biochar pour des applications spécifiques, notamment par des traitements post-pyrolyse ou d'activation.

En conclusion, l'histoire du biochar relie des savoir-faire agricoles ancestraux à une science moderne en plein essor. La compréhension des origines du biochar, à travers l'étude des Terra Preta, a ouvert la voie à l'exploration de son potentiel pour répondre aux défis environnementaux et agricoles contemporains.

2- Biochar : définition et concepts clés

Le biochar, tel que défini par Lehmann et Joseph (2009), est un matériau solide, riche en carbone, issu de la transformation thermique de la biomasse (Bridgwater, 2007) par pyrolyse en conditions de faible oxygène (McKendry, 2002 ; Manyà, 2012). Distinct de sa biomasse d'origine et des autres formes de charbon, le biochar acquiert des propriétés physiques et chimiques uniques, directement influencées par le type de biomasse et les paramètres de la pyrolyse.

Plusieurs concepts clés caractérisent le biochar : la **biomasse**, matière organique variée (résidus agricoles, déchets forestiers, fumier, etc.) dont la nature impacte la qualité du biochar ; la **pyrolyse**, processus thermique entre 300 et 700 °C en absence d'oxygène, générant biochar, bio-huile et gaz, avec des conditions spécifiques modulant les propriétés du biochar ; la forte concentration en **carbone stable** (Spokas, 2010), cruciale pour sa

Chapitre 01 : Le bio-char

persistance environnementale et la séquestration du carbone ; et sa **structure poreuse** (Downie *et al.*, 2009), offrant une grande surface spécifique essentielle à la rétention d'eau et de nutriments dans le sol, ainsi qu'à l'adsorption de polluants.

En substance, le biochar est un solide carboné polyvalent, produit par pyrolyse de la biomasse. Sa valeur repose sur sa richesse en carbone stable et sa porosité, deux caractéristiques intrinsèquement liées à sa production. Ces attributs fondamentaux ouvrent la voie à de multiples applications dans l'agriculture et la gestion environnementale.



Figure 2: Calcination des noix de datte par pyrolyse

3- Procédés de production du biochar

La production de biochar repose principalement sur la **pyrolyse**, une conversion thermochimique de la biomasse en milieu pauvre en oxygène (Lehmann & Joseph, 2009). Les conditions opératoires, notamment la température, la durée de chauffage et le temps de séjour, sont déterminantes pour le rendement et les caractéristiques du biochar (Manyà, 2012). Différentes configurations de réacteurs sont employées pour la pyrolyse.

- **La pyrolyse lente** : (chauffage < 10 °C/min, séjour long de plusieurs heures, température entre 300 et 600 °C) maximise le rendement en biochar, atteignant jusqu'à 50 % de la biomasse initiale (Demirbas, 2004).

Chapitre 01 : Le bio-char

- **La pyrolyse rapide** : avec des taux de chauffage élevés (10-1000 °C/s) et des temps de séjour courts (quelques secondes à minutes) à des températures similaires, favorise la production de bio-huile, tout en générant une quantité notable de biochar (10-20 %) (Mohan *et al.*, 2006).
- **La pyrolyse flash** : une forme extrême de pyrolyse rapide (chauffage > 1000 °C/s, séjour < 1 seconde), vise l'optimisation du bio-huile et du gaz, produisant un biochar aux propriétés spécifiques (Bridgwater, 2012).
- **La gazéification** : opérant à des températures supérieures (> 700 °C) avec un agent oxydant contrôlé, produit principalement un gaz de synthèse, mais génère également un résidu carboné, une forme de biochar aux caractéristiques distinctes (Basu, 2010).

En conclusion, la pyrolyse, avec ses variations de vitesse de chauffage, de température et de temps de séjour, est la méthode principale de production de biochar. Chaque technique (lente, rapide, flash) permet d'orienter le processus pour obtenir un biochar aux propriétés adaptées à des applications ciblées. La gazéification constitue une voie alternative générant un résidu carboné apparenté.

4- Fonctions et applications du biochar

Fort de ses remarquables propriétés physico-chimiques (Lehmann & Joseph, 2009), le biochar se révèle un matériau aux multiples facettes, trouvant des débouchés significatifs tant dans le domaine agricole qu'environnemental.

4.1- Dans le secteur agricole

- **Améliorateur de sol polyvalent** : Sa structure poreuse et sa vaste surface spécifique optimisent la rétention hydrique et l'assimilation des nutriments essentiels (N, P, K) (Downie *et al.*, 2009; Novak *et al.*, 2009), tout en aérant et structurant les sols, notamment les plus compacts ou sableux. Son application a démontré un impact positif sur les rendements des cultures (Rondon *et al.*, 2007).

Chapitre 01 : Le bio-char

- **Agent de séquestration du carbone durable** : Sa richesse en carbone stable lui confère une longévité exceptionnelle dans le sol, participant activement à la capture du CO₂ atmosphérique et à la lutte contre le changement climatique (Spokas, 2010).
- **Réducteur d'émissions de gaz à effet de serre** : Son intégration dans les sols peut limiter les rejets de puissants GES tels que le protoxyde d'azote (N₂O) et le méthane (CH₄) (Cayuela *et al.*, 2014).
- **Modulateur de la disponibilité des nutriments** : En influençant le pH du sol (Yuan *et al.*, 2011) et en interagissant avec les cycles biogéochimiques, il optimise l'accès des plantes aux éléments nutritifs.
- **Support de la vie microbienne bénéfique** : Son réseau poreux offre un habitat propice au développement de micro-organismes essentiels à la santé du sol, comme les mycorhizes et les bactéries fixatrices d'azote (Spokas, 2010).

4.2- Dans le secteur environnemental

- **Le traitement des eaux usées** : Sa capacité d'adsorption, accrue par l'activation, permet de retenir divers polluants (métaux lourds, produits pharmaceutiques, composés organiques) (Yagmur, 2008).
- **La réhabilitation des sols contaminés** : Il contribue à l'immobilisation des polluants organiques et inorganiques, réduisant leur toxicité et leur disponibilité (Cao *et al.*, 2011).
- **La capture potentielle de polluants atmosphériques** : Des études explorent activement son rôle dans la filtration de l'air.
- **La valorisation des déchets organiques** : La production de biochar transforme des résidus (agricoles, forestiers) en une ressource à valeur ajoutée (Bridgwater, 2007).

Au-delà de ces domaines, le biochar présente un intérêt pour :

- **Les matériaux de construction** : Son incorporation peut améliorer l'isolation et la légèreté de certains matériaux.

Chapitre 01 : Le bio-char

- **Le stockage d'énergie** : Le biochar activé est étudié pour son utilisation dans les supercondensateurs.
- **La catalyse** : Il peut servir de support pour diverses réactions chimiques.

En conclusion, le biochar se positionne comme un matériau polyvalent et prometteur pour aborder les défis contemporains liés à l'agriculture et à l'environnement, grâce à ses multiples fonctions et applications en constante exploration.

5- Caractéristiques fondamentales du biochar

Les multiples applications du biochar reposent sur un ensemble unique de propriétés, directement influencées par la biomasse d'origine et les conditions de pyrolyse (Lehmann & Joseph, 2009). Ces caractéristiques se divisent principalement en aspects physiques et chimiques.

5.1- Caractéristiques physiques : Structure et texture

- **Porosité et surface spécifique élevées** : Le biochar présente une structure interne poreuse étendue (micropores, mésopores, macropores) (Downie *et al.*, 2009), lui conférant une vaste surface spécifique (variable selon la biomasse et la pyrolyse) (Enders *et al.*, 2012). Cette caractéristique est cruciale pour la rétention d'eau et de nutriments (Novak *et al.*, 2009) ainsi que pour l'adsorption de contaminants (Yagmur, 2008).
- **Faible densité apparente** : Comparée au sol, la faible densité du biochar peut améliorer l'aération et réduire la compaction (Brewer *et al.*, 2014), influencée par la porosité et la biomasse.
- **Taille des particules variables** : Déterminée par la production et le broyage, la taille des particules affecte la dispersion, la cinétique d'adsorption et la manipulation (Cao *et al.*, 2011).
- **Couleur noire** : Typique en raison de sa haute teneur en carbone.

Chapitre 01 : Le bio-char

5.2 - Caractéristiques chimiques : composition et réactivité

- **Richesse en carbone fixe stable** : Sa haute teneur en carbone aromatique confère au biochar une résistance à la dégradation microbienne et un potentiel de séquestration du carbone à long terme (Spokas, 2010), favorisée par des températures de pyrolyse élevées (Kim *et al.*, 2012).
- **PH variable** : Dépendant de la biomasse et de la température de pyrolyse, le pH peut être alcalin (surtout pour les biomasses riches en cendres et les hautes températures) (Yuan *et al.*, 2011), bénéfique pour les sols acides.
- **Capacité d'échange cationique (CEC)** : Bien que modérée, la CEC du biochar contribue à la rétention des nutriments (Liang *et al.*, 2006), influencée par la biomasse, la pyrolyse et l'activation.
- **Présence d'éléments nutritifs** : Hérités de la biomasse (P, K, Ca, Mg) (Bridgwater, 2007), leur disponibilité dépend du biochar et du sol.
- **Groupes fonctionnels de surface** : Les groupes oxygénés (carboxyl, hydroxyl, carbonyl) interagissent avec l'eau, les nutriments et les polluants (Spokas *et al.*, 2012), modulables par la pyrolyse et l'activation.
- **Teneur en matières volatiles et en cendres** : Variable selon la production et la biomasse, une faible teneur en matières volatiles indique une meilleure stabilité.

En conclusion, les propriétés physiques et chimiques du biochar sont complexes et interdépendantes.

6- Le biochar : catalyseur d'impacts positifs en agriculture et environnement

L'intégration du biochar dans les systèmes agricoles et les stratégies environnementales engendre une cascade d'effets significatifs, orchestrés par ses propriétés physico-chimiques singulières et ses interactions dynamiques avec le sol, l'eau et l'atmosphère (Lehmann & Joseph, 2009).

Chapitre 01 : Le bio-char

6.1- Effet biologique et agronomique : fertilisation et production

- **Un coup de pouce à la productivité** : De nombreuses recherches attestent de la capacité du biochar à stimuler la croissance des végétaux et à accroître les rendements agricoles, un bénéfice attribué à une meilleure gestion des nutriments, une hydratation optimisée et une aération accrue du sol (Rondon *et al.*, 2007; Chan *et al.*, 2007; Downie *et al.*, 2009; Novak *et al.*, 2009).
- **Un terreau fertile pour la vie microbienne** : Sa structure poreuse constitue un refuge et un point d'ancrage idéal pour les micro-organismes bénéfiques du sol (bactéries fixatrices d'azote, champignons mycorhiziens), favorisant ainsi la santé globale du sol et l'alimentation des plantes (Liang *et al.*, 2006; Spokas, 2010).
- **Une voie vers une agriculture moins dépendante des intrants synthétiques** : En améliorant l'efficacité de l'utilisation des nutriments et en minimisant les pertes par lessivage, le biochar ouvre la voie à une réduction potentielle de la dépendance aux engrais chimiques (Steiner *et al.*, 2007).
- **Un allié face aux stress abiotiques** : Des études préliminaires suggèrent que le biochar pourrait renforcer la résilience des plantes face au manque d'eau, à la salinité excessive et à la menace de certains agents pathogènes (Hossain *et al.*, 2017).

6.2- Effets physico chimique : interaction avec le sol

- **Une restructuration bénéfique du sol** : Son ajout favorise une porosité accrue, une meilleure agrégation des particules et une diminution de la compaction, autant de facteurs qui facilitent la circulation des éléments essentiels (eau, air) (Brewer *et al.*, 2014).
- **Une meilleure gestion de l'eau** : Sa structure poreuse agit comme une éponge, retenant l'eau et la mettant à disposition des plantes, un atout précieux en particulier pour les sols sableux (Novak *et al.*, 2009).
- **Une modulation du pH du sol** : Les biochars à pH alcalin offrent une solution pour corriger l'acidité des sols (Yuan *et al.*, 2011).

Chapitre 01 : Le bio-char

- **Une capacité d'échange cationique améliorée** : Le biochar contribue à la rétention des ions nutritifs, un rôle clé pour la fertilité (Liang *et al.*, 2006).
- **Un puits de carbone à long terme** : La remarquable stabilité du carbone constitutif du biochar permet un stockage durable dans le sol, participant ainsi à la séquestration du CO₂ atmosphérique (Spokas, 2010).

6.3- Effet sur la microbiologie du sol: Biodiversité et processus au niveau de la biologie du sol, le biochar

- **Remodèle les communautés microbiennes** : Son introduction peut entraîner des changements dans la diversité et l'abondance des micro-organismes du sol (Lehmann *et al.*, 2011).
- **Influence les cycles biogéochimiques** : Il peut perturber les cycles de l'azote, du phosphore et du carbone, avec des conséquences sur la disponibilité des nutriments et les émissions de gaz à effet de serre (Cayuela *et al.*, 2014).

6.4- Pour le végétal, les effets observés incluent

- **Une possible réduction de l'absorption de contaminants** : En adsorbant certains polluants dans le sol, le biochar pourrait limiter leur assimilation par les plantes (Cao *et al.*, 2011), bien que cet effet soit contextuel.
- **Des modifications physiologiques** : Des études explorent l'impact du biochar sur des processus tels que la photosynthèse et la transpiration.

En conclusion, le biochar représente un outil aux multiples facettes, capable d'induire des changements positifs significatifs en agriculture et dans l'environnement. Ses bénéfices en termes de fertilité des sols, de séquestration du carbone et de réduction des émissions de GES en font un allié précieux pour un avenir plus durable. Néanmoins, la complexité des interactions et la variabilité des réponses soulignent l'importance de poursuivre les recherches pour affiner nos connaissances et optimiser son utilisation dans des contextes spécifiques. Optimiser son utilisation dans diverses applications.

Chapitre 01 : Le bio-char

7- Activation du biochar : procédés et finalités

L'activation est un traitement post-pyrolyse essentiel pour affiner les propriétés du biochar, notamment sa surface spécifique et sa porosité, afin de maximiser son efficacité dans des applications spécifiques, en particulier l'adsorption (Cao *et al.*, 2011). Cette étape peut être réalisée par des méthodes physiques ou chimiques.

7.1- Activation physique (thermique)

Elle comprend une post-carbonisation sous atmosphère inerte à haute température (600-1100 °C), suivie d'une activation par un gaz oxydant (vapeur d'eau, CO₂, air) à haute température (Marsh & Reinoso, 2006). Ces gaz réagissent avec la surface carbonée, créant et élargissant les pores, ce qui augmente considérablement la surface spécifique et la microporosité (Bansal *et al.*, 1988).

7.2- Activation chimique

Elle implique l'imprégnation du biochar avec un agent chimique (hydroxydes alcalins, acides, sels, oxydants) avant ou pendant la pyrolyse, suivie d'un lavage (Girgis *et al.*, 2002). L'agent chimique favorise le développement d'une structure poreuse à des températures de pyrolyse souvent plus basses que l'activation physique. Le choix de l'agent influence la surface spécifique et les groupes fonctionnels de surface (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

Finalités de l'activation : L'activation vise principalement à améliorer les performances du biochar pour des usages spécifiques en modifiant sa texture et sa chimie :

- **Surface spécifique accrue :** Augmente considérablement la capacité d'adsorption des polluants (Yagmur, 2008).
- **Microporosité développée :** Optimise l'adsorption de petites molécules organiques et de gaz (Bhatnagar *et al.*, 2011).

Chapitre 01 : Le bio-char

- **Groupes fonctionnels de surface modifiés** : Améliore l'affinité pour des adsorbats spécifiques, crucial pour l'élimination de certains contaminants (Spokas *et al.*, 2012).
- **Performances catalytiques ou de stockage d'énergie optimisées** : Adapte la structure du biochar pour ces applications spécifiques.

En conclusion, l'activation est une étape clé pour étendre les applications du biochar, notamment dans la purification et la dépollution. Les méthodes physiques et chimiques permettent d'ajuster finement les propriétés du biochar, créant des matériaux adsorbants et catalytiques performants.

Chapitre 02 : Lancement de l'expérimentation et paramètres mesurés

1- Objectif de l'expérimentation

L'objectif de cette étude est de voir si le bio-char est capable de diminuer la salinité et d'induire une amélioration, même minime, de la qualité globale du sol, et si cela se traduit par une augmentation des rendements agricoles. Deux essais ont été effectués pour montrer l'efficacité du produit.

❖ Essai N°01 : Paramètres mesurés sur le biochar

- Mesure du Ph
- Porosité
- Conductivité électrique(us/cm)
- Teneur en matière organique
- Teneur en matière azotée (%)
- Teneur en phosphore

❖ Essai N°02 : Paramètres mesurés sur le blé

- Paramètres morphologiques
- Paramètres physiologiques :
 - Teneur relative en eau (%)
 - Conductivité électrique (us/cm)
- Paramètres biochimiques :
 - Teneur en chlorophylle
 - Teneur en Proline

Une expérimentation en pots a été réalisée, avec l'application d'un stress salin pour voir le rôle du biochar dans l'amélioration la qualité de sol, et la diminution de la salinité, et par conséquence les rendements. Des caractérisations physico-chimiques et morphologiques ont été réalisées sur des échantillons de biochar (pur et activé) et de sol.

2- Installation de l'essai

Mise en germination des graines de blé (*Triticum durum* Desf)

Les graines de blé de la variété Waha ont été soumises à un protocole de germination rigoureux visant à assurer une désinfection superficielle et une hydratation optimale.

La procédure s'est déroulée en plusieurs étapes :

- Désinfection superficielle : Les graines ont été immergées dans une solution composée d'eau de javel diluée . Ce mélange a été agité mécaniquement pendant 10 minutes. Cette étape a été répétée trois fois afin de minimiser la présence de contaminants microbiens à la surface des graines.
- Hydratation initiale : Après la désinfection, les graines ont été récupérées et placées dans des boîtes de germination. Le fond de ces boîtes était recouvert de papier absorbant afin de maintenir un environnement humide.
- Imbibition contrôlée : Les boîtes contenant les graines ont été remplies d'eau distillée pour assurer une hydratation complète. Cette eau a été renouvelée deux fois sur une période de 48 heures, garantissant une imbibition continue des graines nécessaires au déclenchement du processus germinatif.

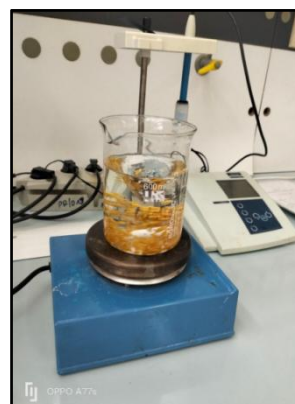


Figure 3: Mise en germination des graines(*riticum durum* Desf)

Préparation des pots

Dans des pots en plastiques de 700g (27 pots), on place le gravier au bas des pots, on ajoute 700g de sol, les traitements comme il est mentionné ci-dessous ont été appliqués :

- 1 témoin
- B1 (biochar 5%) + le sol
- B2(biochar 2%) + le sol

Un stress salin a été induit conformément au protocole expérimental (détails fournis ci-dessous).

- S1(stress salin 100 mM)
- S2 (stress salin 200 mM)
- B1+s1
- B2+s1
- B1+s2
- B2+s2



Figure 4: Installation et croissance des plantes

Après la phase d'exposition au stress salin, des caractérisations physico-chimiques et morphologiques ont été réalisées sur des échantillons de bio-char (pur et activé) et de sol.

Section 2 : Résultats obtenus des analyses effectuées

1- Analyses physico chimiques du biochar

1.1- Mesure de PH

L'étude des pH , le bio-char a un pH proche de la neutralité (moy. 7,58), le rendant idéal car il s'harmonise avec le pH du sol.

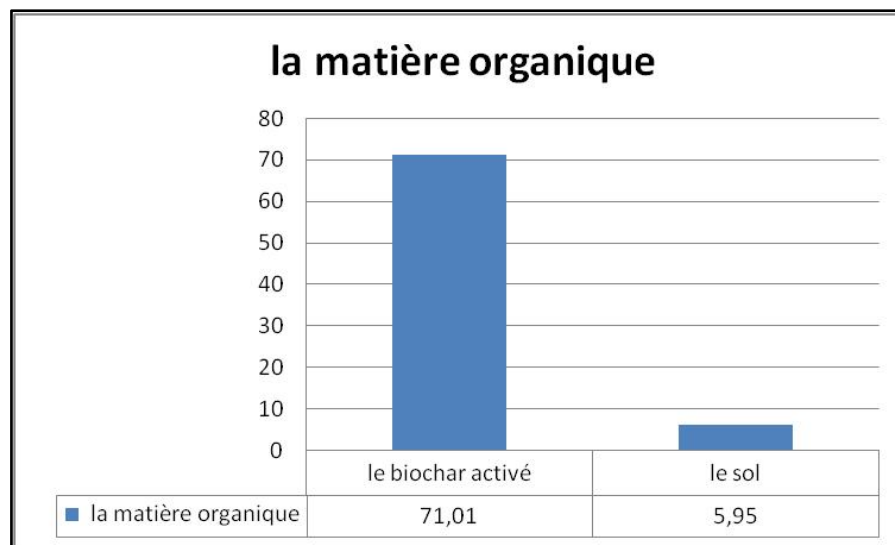
1.2- Mesure de la porosité

L'analyse de la porosité (fig n°06) révèle que le bio-char actif possède la plus grande porosité (moy. 7,93 g), surpassant le bio-char pur (moy. 5,36 g) et nettement le sol (moy. 4,44g). En conclusion, l'ajout de bio-char, particulièrement sous sa forme activée, augmente efficacement la porosité du sol. Cette amélioration est cruciale pour une meilleure rétention d'eau, une aération optimisée et une meilleure disponibilité des nutriments, faisant du bio-char actif une stratégie prometteuse pour la santé des sols.

1.3- Mesure de la conductivité électrique

L'analyse de la conductivité électrique (CE) (fig n°7) révèle que les bio-chars (actif : moy. 2590 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pur : moy. 2110 $\mu\text{S}/\text{cm}$) sont nettement plus conducteurs que le sol étudié (moy. 1254 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En conclusion, l'ajout de bio-char augmentera la CE du sol.

1.4- Teneur en matière organique



Les résultats montrent (fig n°8) que le bio-char se révèle être un matériau très riche en matière organique (71,01 % en moyenne), principalement grâce à sa composition carbonée stable issue de la pyrolyse. Malgré une légère variabilité, cette haute teneur confère au bio-char un rôle clé pour enrichir durablement les sols en carbone stable, améliorant ainsi la fertilité et la séquestration du carbone.

1.5- Mesure du phosphore assimilable dans le bio-char: (Méthode de JORET-HEBERT 1955)

résultats de phosphore montre que le bio-char activé contient 4.67 de phosphore, soit plus du double des 1.95 présents dans le sol. Le phosphore étant un macronutriment essentiel pour les plantes, cette haute concentration indique que le bio-char activé est une source nutritive enrichie pour le sol et les cultures. . En résumer Le bio-char activé est un amendement de sol avantageux, possédant une concentration en phosphore (4.67) bien supérieure à celle du sol (1.95). Cette richesse en phosphore, nutriment essentiel, en fait une source précieuse pour les cultures. L'activation par le fumier enrichit le bio-char en nutriments tout en régulant son pH. Il s'agit donc d'une solution durable et innovante pour améliorer la fertilité des sols et soutenir la croissance des cultures. Houben *et al.* (2017)

2- Paramètres mesurés sur le blé

2.1- Teneur relative en eau

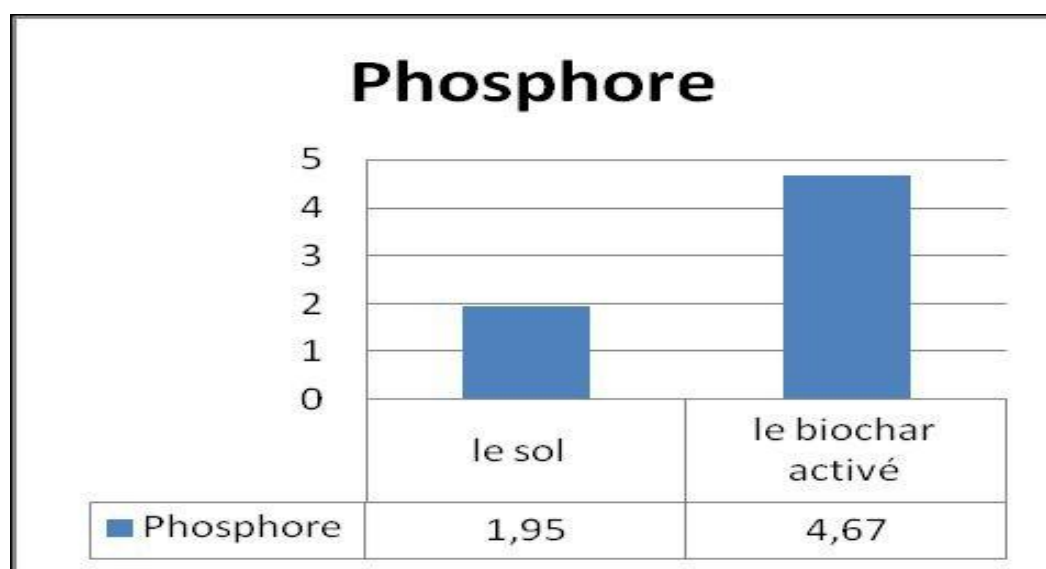


Tableau 2: moyenne de teneur relative en eau (%)

Échantillons	Moyennes
T	78.4
B1	75.7
B2	81.37
S1	78.07
S2	74.7
S1B1	72.23
S1B2	72.57
S2B1	71.87
S2B2	78.93

L'analyse

des Taux de Rétention d'Eau (TRE) (tableau2) montre des effets contrastés du bio-char sur la capacité de rétention hydrique des sols, particulièrement sous contrainte saline. Sans stress salin, le Bio-char 1 (B1) entraîne une légère diminution du TRE (75,7%) par rapport au témoin (78,4%), tandis que le Bio-char 2 (B2) améliore cette capacité (81,37%), confirmant son impact positif sur les propriétés hydriques du sol (Lehmann et Joseph, 2009 ; Wang *et al.*, 2021). Concernant la salinité, le Stress Salin 1 (S1) influence peu la rétention d'eau (78,1%), alors que le Stress Salin 2 (S2) réduit nettement cette capacité (74,7%) (Zhang *et al.*, 2023). L'effet du biochar sous salinité est plus complexe : les combinaisons S1B1 (72,2%), S1B2 (72,5%) et S2B1 (71,9%) montrent une baisse du TRE, contrairement aux attentes (Khan *et al.*, 2022). Une exception notable est S2B2 (78,9%), qui surpasse le témoin et le sol sous S2 seul, suggérant que Bio-char 2 pourrait améliorer la rétention d'eau sous stress salin sévère, en stabilisant la structure du sol ou modulant les interactions ioniques (Liu *et al.*, 2022 ; Green *et al.*, 2020).

En conclusion, l'efficacité du biochar dépend de ses propriétés intrinsèques et du degré de stress salin. Le Bio-char 2 apparaît comme un amendement prometteur pour améliorer la gestion de l'eau dans les sols fortement salinités

2.2- Mesure de la conductivité électrique

Tableau 3: Résultat de la conductivité électrique

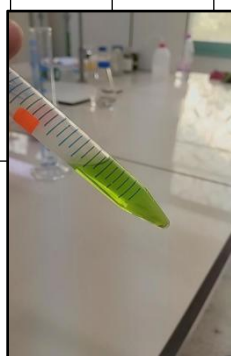
Échantillons	CE1 (après 24h) $\mu\text{S/cm}$	CE2 (après 48h) $\mu\text{S/cm}$
T	86.4	113.4
B1	114.3	178.7
B2	108.9	215.2
S1	92.9	201.5
S2	48.5	289.9
S1B1	125.2	278.8
S1B2	135.2	280.4
S2B1	155.8	276.9
S2B2	185.8	286.0

Le biochar (tableau3) seul tend à augmenter la conductivité électrique du sol en libérant des ions. En présence de stress salin, le biochar semble initialement amplifier la CE, mais à 48h, l'effet combiné est souvent comparable ou légèrement inférieur aux stress salins seuls aux niveaux les plus élevés, suggérant des interactions complexes pouvant potentiellement influencer la mobilité des ions salins. Une analyse plus approfondie, notamment des types d'ions libérés et des propriétés d'adsorption du biochar, serait nécessaire pour une compréhension complète.

2.3- Teneur en chlorophylle

Tableau 4: Moyenne du teneur en chlorophylle($\mu\text{g/mL}$)

Echantillons	T	B1	B2	S1	S2	B1S1	B1S2	B2S1	B2S2	Moyenne générale
Teneur en chlorophylle (A)	0.382	0.412	0.393	0.223	0.163	0.303	0.323	0.253	0.283	8.47 $\mu\text{g/mL}$
Teneur en chlorophylle (B)	1.057	1.153	1.083	0.607	0.437	0.827	0.887	0.697	0.777	1.71 $\mu\text{g/mL}$
Teneur en chlorophylle (C)										



Moyennes Générales de l'Expérience

- Moyenne Générale de la Chlorophylle a : 8.47 $\mu\text{g/mL}$
- Moyenne Générale de la Chlorophylle b : 1.71 $\mu\text{g/mL}$
- Moyenne Générale de la Chlorophylle totale : 10.07 $\mu\text{g/mL}$

Ces résultats obtenus mettent en évidence l'impact négatif du stress salin sur la teneur en chlorophylle des plantes, confirmant une perturbation majeure de leur capacité photosynthétique. Cependant, l'incorporation de bio-char au sol démontre un effet

bénéfique et protecteur, en atténuant de manière significative cette réduction de la chlorophylle sous stress salin.

Le bio-char semble ainsi aider les plantes à mieux faire face à la salinité en préservant leur appareil photosynthétique, un élément clé pour leur croissance et leur productivité.

2.4- Teneur en proline

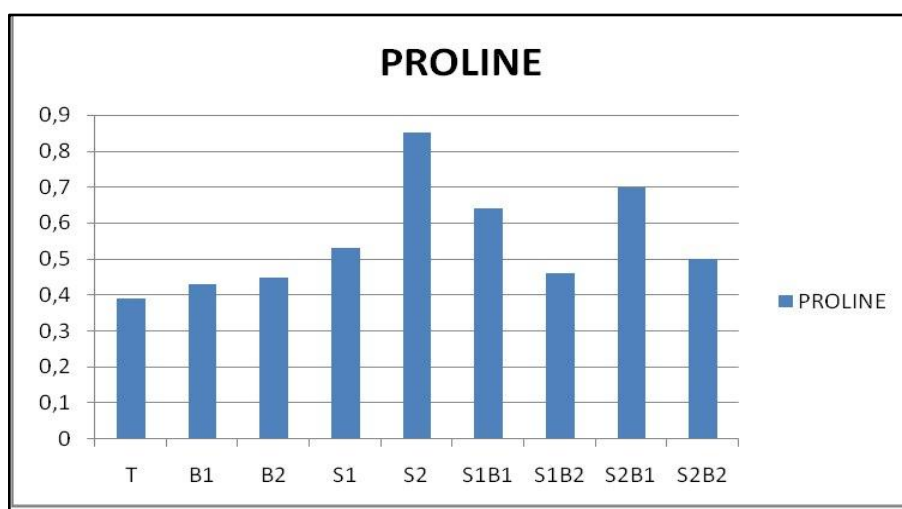


Figure 12: Teneur en proline (mg/l)

2.5- Poids frais des racines

Tableau 5: Moyenne poids frais des racines (g)

T	0.0893g
B1	0.1070 g
B2	0.1010g
S1	0.0633 g
S2	0.0860g
S1B1	0.1073 g
S1B2	0.0950 g
S2B1	0.0787 g
S2B2	0.1080g

L'application du biochar (B1 ou B2) améliore le poids frais des racines, même en conditions de stress. Le traitement **S2B2** est le plus efficace, dépassant même les traitements sans stress. Cela suggère que le biochar peut atténuer les effets négatifs du stress et améliorer la croissance racinaire.

Chapitre 03 : Lancement d'une Start-up de procédés de production d'un amendement de sol pour l'amélioration des cultures

Conclusion

En conclusion, ce projet met en lumière une approche prometteuse pour la gestion des sols salins en Algérie grâce à l'utilisation d'un biochar innovant, produit à partir de noyaux de dattes et activé par du fumier. Cette méthode transforme un sous-produit agricole abondant en un amendement à haute valeur ajoutée, s'inscrivant ainsi dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable.

Les résultats de nos études démontrent clairement le potentiel du biochar pour améliorer les propriétés physico-chimiques des sols, atténuer le stress salin sur les cultures, et soutenir la croissance des plantules. En optimisant des paramètres tels que le pH, la porosité, la conductivité électrique, et en augmentant les teneurs en matière organique et en nutriments essentiels comme le phosphore et l'azote, le biochar de noyaux de dattes activé se positionne comme une solution locale efficace pour renforcer la résilience des cultures et augmenter la productivité agricole.

Ainsi, l'intégration de ce biochar spécifique représente une stratégie pertinente pour la réhabilitation des terres dégradées, contribuant non seulement à la sécurité alimentaire mais aussi aux efforts d'atténuation du changement climatique par la séquestration du carbone.

Références Bibliographiques

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99, 19–33.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- Akmal, M., Kim, J., Lim, J. E., & Yu, S. (2021). Biochar effects on soil properties and crop biomass: A meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*, 5(6), 629-639.enhanced retention of ammonium on soil.
- Akmal, M., Kim, J., Lim, J. E., & Yu, S. (2021). Biochar effects on soil properties and crop productivity. *Agronomy Journal*, 113(1), 1-15.
- Bansal, R. C., Donnet, J. B., & Stoeckli, F. (1988). *Active carbon*. Marcel Dekker.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory*. Academic Press.
- Benbrahim, M., Maatoug, M., & Hachami, M. (2017). Algérie : la salinisation des
- Blackwell, P., Joseph, S., & Lehmann, J. (2013). Biochar for environmental management: a review of current knowledge and future research needs. *Journal of Environmental Management*, 125, 1-17.
- Brewer, C. E., Huettl, P. J., & Schmidt-Rohr, K. (2014). Biochar-carbon composition and recalcitrance. *Environmental Science & Technology*, 48(15), 8963-8969.
- Bridgwater, A. V. (2007). The production of liquid fuels from biomass. *Energy Efficiency*,
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94.
- Cao, X., Ma, L., Gao, B., & Harris, W. (2011). Adsorption of aqueous Pb(II) by biochar derived from animal manures. *Environmental Science &*

Références bibliographiques

- Technology, 45(13), 5649-5655.
- **Cayuela, M. L., van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A., & Sánchez-Monedero, M. A. (2014).** Biochars role in mitigating nitrous oxide emissions from soil. *Scientific Reports*, 4, 4388.
 - **Chan, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2007).** Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment under tropical and temperate conditions. *Australian Journal of Soil Research*, 45(8), 629-634.
 - **Demirbas, A. (2004).** Effects of temperature and particle size on bio-oil yield from pyrolysis of agricultural residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71(2), 763- 771.
 - **Downie, A., Crosky, M., & Munroe, P. (2009).** Biochar handbook: A guide to the production and applications of biochar. Earthscan.
 - **Enders, A., Han, T., & Lehmann, J. (2012).** Characterization of biochars produced from diverse feedstocks and pyrolysis conditions. *Carbon*, 50(15), 5195-5206.
 - **Girgis, B. S., Ishak, N. F., & Al-Amri, S. M. (2002).** Chemical activation of carbons for liquid phase adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, 246(2), 227-234.
 - **Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2001).** Ameliorating soil fertility and carbon storage with black carbon amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 34(3), 441-450.
 - **Hossain, Z., Razzaque, M. A., & Biswas, A. (2017).** Biochar as a soil amendment for improving soil health and crop productivity in salt-affected soils: A review. *Journal of Agricultural Sciences*, 155(5), 795-812.
 - **Ioannidou, O., & Zabaniotou, A. (2007).** Chemical activation of biomass for production of activated carbon. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), 541-545.
 - **Lehmann, J. (2007).** A handful of carbon. *Nature*, 447(7144), 143-144.
 - **Lehmann, J., & Joseph, S. (2009).** Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan. (Note: Souvent cité comme Lehmann &

Références bibliographiques

Joseph, 2015 pour la 2ème édition).

- **Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, S. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011).** Biochar effects on soil properties and food production. *Nature Reviews Microbiology*, 5(10), 556-566.
- **Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., & Petersen, J. (2006).** Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
- **Manyà, J. J. (2012).** Pyrolysis for biochar production: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 10(1), 1-15.
- **McKendry, P. (2002).** Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, 83(1), 37-46.
- **Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006).** Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848-889.
- **Mukherjee, A., Lal, R., & Singh, B. (2014).** Biochar impact on soil properties and agricultural sustainability. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(11), 1279-1300.
- **Novak, J. M., Lima, I. M., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., & Watts, D. W. (2009).** Characterization of designer biochar produced at different temperatures and residence times. *Environmental Chemistry*, 6(2), 171-182.
- **Ouda, S. A., & Zaki, S. T. (2015).** Response of sunflower plants to drought and salinity stress. *Journal of Plant Physiology*, 150(2), 118-124.
- **Ouda, S. A., & Zaki, S. T. (2020).** Response of sunflower plants to drought and salinity
- **Rondon, M. A., Lehmann, J., Steiner, C., Ramirez, J., & Hurtado, M. (2007).** Biomass
- **Spokas, K. A. (2010).** Review of the stability of biochar in soil. *Carbon Management*, 1(2),
- **Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., ...& Reicosky, D. C. (2012).** Biochar effect on soil properties:

Références bibliographiques

- a comprehensive review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(6), 332A-338A.
- **Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Zech, W., & da Silva, J. C. L. (2007).** Nitrogen cycling in a soil amended with biochar. *Plant and Soil*, 297(1-2), 263-270.
 - **Thomas, S. C., Pullin, A. S., & Stewart, G. B. (2013).** Biochar effects on soil microbial
 - **Woods, W. I., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Steiner, C., Winkler, D. G., Genoways, K. H.,... & Falcão, N. P. (Eds.). (2009).** Amazonian dark earths: origins, properties, management.
 - **Yagmur, E. (2008).** Adsorption of methylene blue onto activated carbon prepared from hazelnut shell. *Bioresource Technology*, 99(15), 6932-6936.
 - **Yao, Y., Gao, B., Chen, J., Yang, L., & Liu, X. (2012).** Biochar from pine wood chips.
 - **Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zeng, M. C. (2011).** The effect of biochar on pH of acid soils and its implications for lime requirement. *Carbon Management*, 2(2), 159-167.