

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun – Tiaret

Faculté des Sciences de la nature et de la vie

Département Sciences de la Nature et de la Vie



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Génétique moléculaire et amélioration des plantes

Présenté par :

- CHERIF DJAMILA

- MOSTEFA NAIMA

Thème

**Caractérisation et étude du potentiel agronomique d'un biochar
issu de la pyrolyse de déchets agricoles**

Soutenue le : 03 / 07 / 2024

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me}. DAHLIA Fatima

Promoteur : M. BOUFARES Khaled

Examinatrice : M^{me}. BOUZID Assia

Année universitaire 2023 - 2024

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir guidé

Tout au long de nos vies qu'il nous a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles et qu'il nous a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui.

Tout d'abord nous remercions notre encadreur M. Boufares Kh qui a accepté de nous encadrer pour nous avoir toujours soutenue conseillée et guidée.

Nous remercions également Mme Dahlia Fatima qui a accepté de présider ce jury et Mme Bouzid Assia d'avoir accepté d'examiner ce travail

Dédicace

À ma chère famille,

À mes chers parents, ma mère et mon père, aucune parole ne peut suffire pour vous rendre hommage comme il se doit. Vous avez toujours été le soutien inébranlable à chaque étape de ma vie. Merci pour votre encouragement constant et votre foi en moi.

À mes frères et sœurs,

vous êtes les piliers et le soutien. Merci pour votre soutien continu qui m'a aidé à atteindre cette réalisation.

À mes chers amis,

à ceux qui ont partagé avec moi les moments de joie et de tristesse, de succès et de déception, un immense merci.

CHERIF DJAMILA

Dédicace

Je dédie ce travail à :

À mes chers parents, qui ne m'ont jamais manqué de soutien et d'encouragement tout au long de mes années d'études, et à mes professeurs respectés qui ont illuminé mon chemin vers la connaissance et la sagesse.

À mes amis et collègues, qui ont été pour moi un soutien précieux à chaque étape de ce parcours. Et à tous ceux qui ont contribué par un mot, un conseil ou un soutien, je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de gratitude

MOSTEFA Naima

Table des matières

Liste des abréviations	i
Liste des tableaux	ii
Liste des figures	iii
INTRODUCTION.....	1
Synthèse bibliographique	4
Chapitre 01 : Biochar	4
1. Generalité	4
1.1. Histoire et Archéologie	4
1.2. Définition du Biocharbon.....	5
1.3. Biomasse	5
1.4. Propriétés du biocharbon.....	6
1.5. Techniques de fabrication de biochar	8
1.6. Formes du biochar	11
1.7. Les domaines d'application du biochar.....	12
La salinité	14
Chapitre 02 : La salinité	14
1. Généralité	14
1.1. La salinité.....	14
1.2. Genèse des sols sodiques ou halomorphes	15
1.3. Classification et caractérisation des sols sales.....	16
1.4. Caractéristiques des eaux salées	19
2. Effet de la salinité sur les plantes.....	20
2.1. Effet de la salinité sur la germination	20
2.2. Effet de la salinité sur l'absorption d'eau et de nutriments	20
2.3. Génération des espèces d'oxygénées réactives	21
2.4. Inhibition de la photosynthèse	21

Partie expérimentale	22
Chapitre 01 : Matériel et méthodes	22
1.1. Matériel végétal	22
1.2. Matériel de laboratoire	22
1.3. Préparation de biochar	23
1.4. Préparation de l'extrait aqueux à froid	23
1.5. Mode d'applications de biochar.....	25
1.6. Paramètres étudiés	29
Chapitre 02 : Résultats et discussion	33
1.1. Précocité de germination.....	33
1.2. Taux de germination final	35
1.3. La cinétique de germination	36
1.4. Longueur de la radicule et tige	38
1.5. Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche	41
1.6. La teneur relative en chlorophylles.....	43
CONCLUSION	45
Références bibliographiques.....	47

Resume

L'objectif de la présente étude était de contribuer à la mise en place d'un bio-engrais à base de biochar obtenu par pyrolyse de déchets agricole à différentes températures, via l'examen de ses effets sur la germination et la croissance de plantules d'orge (*Hordeum vulgare* L) et la laitue (*Lactuca sativa*), cette étude porte aussi sur l'évaluation de l'impact du biochar sur le comportement physiologique de plantules d'orge en condition de stress salin. Différentes températures de pyrolyse et dilutions de biochars (25, 50 et 100%) ont été testé, conjuguées parfois à un stress salin. Les taux de germination, l'indice et la vitesse de germination, poids frais, poids sec, longueur des parties aérienne et racinaire ont été mesurés. Les résultats ont montré que le biochar produit à la température la plus basse, soit 300°C, a significativement amélioré le taux de germination, tandis que les biochars pyrolysé à 400°C et 500°C favorisent la croissance des plantes. De plus, l'ajout du biochar au milieu à atténuer les effets négatifs du stress salin.

Mots-clés : Biochar, Extrait aqueux, Orge, Germination, Fertilité du sol, Stress salin.

الملخص :

كان الهدف من هذه الدراسة هو المساهمة في تطوير سماد حيوي يعتمد على الفحم الحيوي المنتج عن طريق التحلل الحراري للنفايات الزراعية عند درجات حرارة مختلفة، من خلال فحص تأثيراته على إنبات ونمو شتلات الشعير (*Hordeum vulgare* L) والخس (*Lactuca sativa*). تتناول هذه الدراسة أيضاً تقييم تأثير الفحم الحيوي على السلوك الفيزيولوجي لشتلات الشعير في ظروف الإجهاد الملحي. تم اختبار تأثير الفحم الحيوي المنتج في درجات حرارة تحلل مختلفة وتركيز محلول الفحم الحيوي (25% و 50% و 100%)، وأحياناً بالاقتران مع إجهاد ملحي. تم قياس معدلات الإنبات، ومؤشر وسرعة الإنبات، والوزن الطازج والجاف، وطول الأجزاء الهوائية والجذرية.

أظهرت النتائج أن الفحم الحيوي المنتج عند أدنى درجة حرارة، 300 درجة مئوية، قد حسن بشكل ملحوظ معدل الإنبات، في حين أن الفحم الحيوي المنتج عند درجات حرارة 400 و 500 درجة مئوية يعزز نمو النباتات. بالإضافة إلى ذلك، فإن إضافة الفحم الحيوي إلى الوسط يخفف من التأثيرات السلبية للإجهاد الملحي.

الكلمات المفتاحية : الفحم الحيوي ، محلول الفحم الحيوي ، الشعير ، الانتاش، خصوبة التربة ، الإجهاد الملحي.

Abstract:

The objective of the present study was to contribute to the development of a bio-fertilizer based on biochar obtained through pyrolysis of agricultural waste at different temperatures, by examining its effects on the germination and growth of barley (*Hordeum vulgare* L) and lettuce (*Lactuca sativa*) seedlings. This study also aims to evaluate the impact of biochar on the physiological behavior of barley seedlings under salt stress conditions. Various pyrolysis temperatures and biochar dilutions (25%, 50%, and 100%) were tested, sometimes in combination with salt stress. Germination rates, germination index and speed, fresh weight, dry weight, and the length of aerial and root parts were measured.

The results showed that biochar produced at the lowest temperature, namely 300°C, significantly improved the germination rate, while biochars pyrolyzed at 400°C and 500°C promoted plant growth. Additionally, adding biochar to the medium mitigated the negative effects of salt stress.

Keywords: Biochar, Aqueous Extract, Barley, Germination, Soil Fertility, Salt Stress.

Liste des abréviations

BC	Biochar
CEC	Capacité échange cationique.
pH	Potentiel en Hydrogène.
LMT	La longueur moyenne des tiges
LMR	La longueur moyenne des racines
TMG	Le temps moyen de germination
CV	Le coefficient de vélocité

Liste des tableaux

Tableau 1 : Composition de quelques matières ligno-cellulosiques.	6
Tableau 2: Caractéristiques principales des sols salins et sodiques.	17
Tableau 3: Classe de la salinité des sols.	18
Tableau 4 : Caractéristiques des eaux salées.....	19
Tableau 5 : Schéma explicatif des différents extraits de biochar préparés.	23
Tableau 6 : Détermination des TMG et CV pour les graines de laitue.....	37
Tableau 7 : Détermination des TMG et CV pour les graines d’orge.....	37

Liste des figures

Figure 1 : Porosité du biochar.....	7
Figure 2 : Différentes techniques de conversion de la biomasse.	11
Figure 3 : Biochar en poudre.....	11
Figure 4 : Biohar granulé.	12
Figure 5 : Différentes étapes de préparation des extraits de biochar.	24
Figure 6 : Préparation des milieux de culture pour le test germinatif.	24
Figure 7 : Protocole du test de l'effet de différents types de biochars sur la germination.	26
Figure 8 : Photo du dispositif du test germinatif.	26
Figure 9 : Les différentes étapes de l'expérience de croissance.	27
Figure 10 : Photo du dispositif de l'expérience de croissance.....	28
Figure 11 : Photo illustrant l'expérience de la croissance sous stress salin.	29
Figure 12 : Détermination de la teneur relative en chlorophylle.	32
Figure 13 : Précocité de la germination des graines de la laitue. Erreur ! Signet non défini.	
Figure 14 : Précocité de la germination des graines de l'orge.....	34
Figure 15 : Germination des graines de deux espèces en agar-agar et l'extrait de biochar.	34
Figure 16 : Effet des extraits aqueux sur le taux de germination de la laitue.	35
Figure 17 : Effet des extraits aqueux sur le taux de germination de l'orge.	36
Figure 18 : Effet de différents types de biochar sur la longueur de radicule et tige de laitue.	39
Figure 19 : Effet de différents types de biochar sur la longueur de radicule et tige d'orge.	39
Figure 20 : Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche de la laitue.	41
Figure 21 : Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche de l'orge.	42

Figure 22 : Teneur relative en chlorophylles chez les plantes d'orge.	43
--	----

Introduction

INTRODUCTION

Le sol est une ressource précieuse pour la production alimentaire et la santé des écosystèmes. Améliorer la qualité du sol est un enjeu crucial, ce qui fournit aux plantes les nutriments dont elles ont besoin pour se développer et produit des cultures (Lehmann, *et al.*, 2011).

Aujourd'hui on assiste, presque partout dans le monde, à un regain d'intérêt pour les produits locaux et biologique. Les bio-engrais représentent une facette cruciale de l'agriculture moderne axée sur la durabilité et la préservation de l'environnement (Zhang et al, 2013).

Contrairement aux engrais chimiques traditionnels, les bio-engrais sont dérivés de sources organiques telles que les déchets végétaux, les sous-produits agricoles et les déjections animales. (Jeffery, et al., 2011). Leur utilisation s'est accrue ces dernières années en réponse aux préoccupations croissantes concernant les effets néfastes des engrais chimiques sur les sols, l'eau et la biodiversité.

Les déchets organiques de l'agriculture, également appelés résidus agricoles ou biomasse agricole, sont des matériaux organiques générés tout au long du processus agricole, de la production primaire à la transformation des cultures. Ces déchets comprennent une grande variété de matériaux, tels que les pailles, les tiges, les feuilles, les résidus de récolte, les déchets de cultures non récoltées, les fumiers, les lisiers, les déchets de transformation alimentaire, et bien plus encore (Kim et al., 2017).

La valorisation de ces déchets organiques est un processus visant à transformer ces matériaux en produits utiles, tout en réduisant leur impact environnemental. Depuis quelques années, il y a eu des recherches qui se sont penchées sur l'étude de plusieurs déchets jusque-là négligés et qui ont prouvé qu'ils ne sont pas sans aucune valeur. Cette valorisation a éveillé des intérêts pour le développement de nouveaux procédés et la production de nouveau bio-engrais (Kim et al., 2017).

Les bio-engrais offrent plusieurs avantages distincts. Ils enrichissent le sol en matière organique, ce qui améliore sa structure, sa fertilité et sa capacité à retenir l'eau. De plus, ils fournissent aux plantes une gamme complète de nutriments essentiels, favorisant ainsi une croissance saine et durable. Contrairement aux engrais chimiques, qui peuvent entraîner une dépendance croissante et des dommages à long terme aux

sols, les bio-engrais favorisent une approche holistique de la gestion des cultures, en équilibrant les besoins agricoles avec le respect de l'environnement (Koide, et al., 2015).

En outre, les bio-engrais contribuent à la réduction des déchets organiques en les transformant en ressources précieuses pour l'agriculture. Cette approche circulaire favorise la durabilité en minimisant les émissions de gaz à effet de serre associées à la décomposition des déchets organiques. En intégrant les principes de l'agriculture circulaire, les bio-engrais offrent une solution pratique et écologique pour répondre aux défis actuels de la sécurité alimentaire et de la conservation des ressources naturelles.

Par conséquent, des résidus peu coûteux à haute teneur en carbone et à faible teneur en matières inorganiques peuvent être considérés comme des matières premières pour la production de biochar (Jones et al., 2019).

En Algérie, les régions arides et semi-arides se caractérisent par un sol pratiquement squelettique. La sévérité du climat dans ces régions, caractérisée par les rares précipitations et les fortes températures, associées aux surpâturages, a eu un impact très visible qui a conduit à une diminution dans la productivité agricole. Il en résulte à cet effet, une perte dans le stock des matières minérales et organiques dans le sol qui devient infertile (Solaiman et al., 2014).

Devant cette situation, le recours à la fertilisation devient une nécessité, mais malheureusement cette solution se heurte à plusieurs difficultés, la sévérité du climat dans ces régions combinées à une forte évaporation conduit inévitablement à la salinisation des sols et une perte de sa fertilité (Usman et al., 2021).

L'approche alternative consiste à faire appel à des approches globales qui tiennent compte de tous les aspects du développement durable et de la préservation des sols. Les biochars, produits par la pyrolyse de la biomasse, émergent comme une solution alternative prometteuse pour améliorer la fertilité des sols tout en préservant leur santé à long terme (Hua et al , 2012).

Dans ce contexte, vient cette étude, qui a pour objectif la valorisation des déchets agricoles comme ressource dans l'obtention de produits à haute valeur ajoutée à travers la formulation d'un nouveau bio-engrais, et d'évaluer ses capacités à satisfaire les besoins nutritifs des plantes et atténuer les effets du stress salin en comparant le

comportement des plantes soumis à des conditions de stress salin en présence de biochar, depuis le stade germination jusqu'à la maturité.

Ce travail est structuré en deux parties, la première partie représente des rappels bibliographiques sur le biochar, sa fabrication et ses applications, et le stress salin. La deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisées, les essais réalisés, ainsi que les résultats obtenus et leurs interprétations.

***Synthèse* bibliographique**

Chapitre 01 :

Biochar

Synthèse bibliographique

Chapitre 01 : Biochar

1. Generalité

Le biochar est un produit dérivé de la carbonisation de la biomasse organique, tels que les résidus agricoles, les déchets forestiers ou même les déchets urbains. Ce processus de carbonisation, appelé pyrolyse, est effectué à des températures élevées en l'absence d'oxygène, ce qui permet de transformer la matière organique en charbon stable (Awad *et al.*, 2020).

1.1. Histoire et Archéologie

L'origine du biocharbon proviendrait des pratiques agricoles des habitants d'Amazonie qui incorporaient de grandes quantités de charbon au sol ainsi que des fumiers et autres engrais biologiques pour améliorer les rendements de leurs cultures (Koide, *et al.*, 2015).

Après plus de 500 années depuis la fin de ces pratiques agricoles qui ont mené à leur création, les sols noirs d'Amazonie ou Terra Preta sont les plus prisés des sols agricoles pour leur excellente fertilité, leur fort contenu en éléments nutritifs (C, N, P, K et Ca), leur bonne capacité d'échange cationique (CEC) et leur capacité à retenir et recycler les éléments nutritifs sur de longues périodes de culture (Lehmann, *et al.*, 2011).

Au 19^e siècle la découverte d'un sol noir amazonien, la « terra preta », très riches en carbone, qui coexiste avec des sols gris sédimentaires pauvres. Ce sol parfois épais (1 m) est composé d'un mélange de sol en place, de petites particules de charbon de bois, de minéraux de bois et de matière organique humifiée. Cette fertilité serait due à la présence de carbone en forte proportion (9 % de carbone et plus vis-à-vis des sols gris locaux à 5 % MO et moins) (Jeffery, *et al.*, 2011).

1.2. Définition du Biocharbon

Le biocharbon (appelé aussi biochar) est le sous-produit de la pyrolyse, une décomposition thermochimique de la matière organique qui se réalise quand de la biomasse est exposée à des températures supérieures à 350 °C en l'absence ou très peu d'oxygène (Motalebnejad et al., 2023).

Cependant, il se distingue du charbon de bois et des matières analogues du fait que celui-ci est produit dans le but d'être appliqué dans le sol comme moyen d'améliorer la fertilité du sol, d'augmenter le stockage de carbone, ou même de favoriser la filtration de l'eau de percolation du sol (Lehmann et al., 2009).

1.3. Biomasse

Le biocharbon étant un produit issu de la biomasse, la biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles...) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, être vivant du sol).

1.3.1. Types de biomasse

Plusieurs types de matières premières peuvent entrer sous la définition de « biomasse ». La biomasse est essentiellement une substance issue de matière biologique (végétale ou animale).

Cependant, lorsqu'il est question de biomasse énergétique, cette matière première implique les cultures agricoles dédiées (Coquille de noix de coco, paille de riz...) (Jones, et al, 2019), les produits forestiers, les boues municipales ou industriels (Koide,R. T., et al, 2015), (Williams,B, et al, 2019), Le fumier animal (Glaser,B, et al, 2013), les déchets ligneux : (sciure, céréales (Ahmad,M., et al, 2018), (Li et al, 2020).

1.3.2. Matériaux de fabrication

Le biochar est défini par ses propriétés ainsi que par sa source, et il peut être produit à partir de presque n'importe quelle substance organique à forte teneur en carbone. De nombreux sous-produits agricoles ont été utilisés comme source de biochar comme les coquilles de noix de coco (Kim et al., 2017), le bois (Jones et al., 2019), les coquilles d'amande et épluchure d'orange (Williams et al., 2019), les noyaux d'olive (Johnson et al., 2001), les noyaux de dattes (D, patel et al., 2017), le résidu de café (C. Lee et al 2017), balle de riz et bagasse (Lehmann et al., 2011), le déchet de thé (Biederman et al., 2013) et les boues organiques (Solaiman et al., 2014).

La biomasse ligneuse contient, en proportion variable, de l'hémicellulose, de la cellulose et de la lignine, ainsi que de petites quantités de sucre, de protéines, d'amidons et de lipides simples (Usman et al., 2021).

Tableau 1 : Composition de quelques matières ligno-cellulosiques.

Matière lignocellulosique	Hémicellulose (%)	Cellulose (%)	Lignine (%)	
Ecorce de noix de coco	23,70 ± 0,62	0,52 ± 0,01	3,54 ± 0,01	Yang K et al, 2010
Canne à sucre	27-32	32-44	19-24	Rufford TE et al, 2010
Bambou	15-26	26-43	21-31	Liu Q-S et al, 2010
Coquille de tournesol	34,6	48,4	17	Li. X et al, 2011
Bois	24-40	40-50	25-35	Wang. T et al, 2009

1.4. Propriétés du biocharbon

En fonction des températures atteintes lors de la pyrolyse et de la nature de la biomasse initiale, les propriétés physiques et chimiques du produit biocharbon obtenu peuvent varier (Prins et al, 2011).

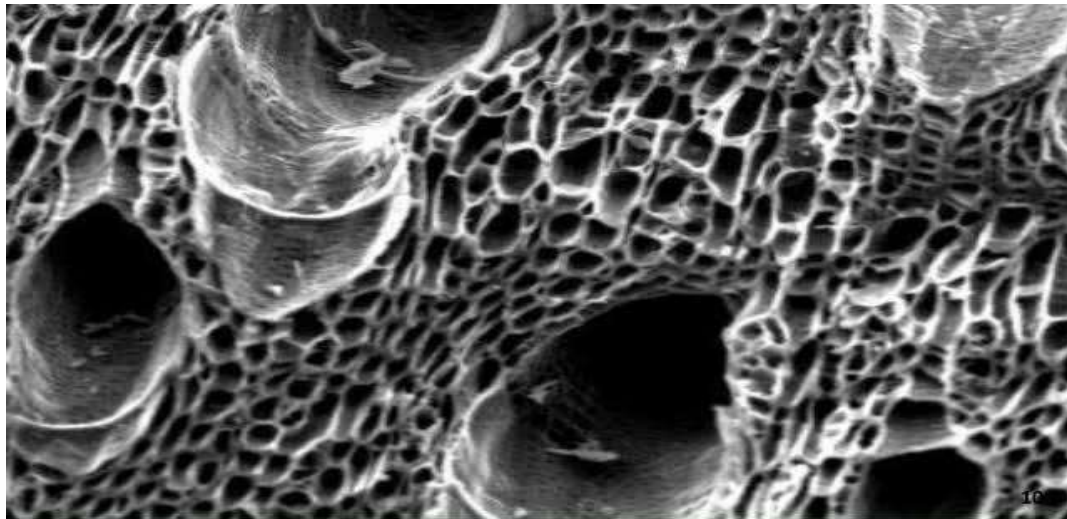
► La densité

Les travaux de Downie et al ont montré que la densité du biochar dépend de la nature de la biomasse ainsi que de la température à laquelle il est produit. Mais d'une manière générale, elle varie entre 0,2 et 0,8 g/cm³ (Qian et al, 2015).

► Surface spécifique et la porosité

Le biocharbon présente une grande surface spécifique qui peut varier entre quelques centaines à 3000 m²/g (Qian et al, 2015). Cette grande surface spécifique constitue un abri pour les microorganismes et un lieu de stockage des nutriments du sol (Qian et al,

2016). Le biocharbon est constitué de milliers de pores qui sont formés lors de la pyrolyse. Pour cette raison, il est en mesure d'absorber jusqu'à cinq fois son poids propre en eau ainsi que les éléments nutritifs qui s'y trouvent sous forme diluée (Reguyal et al, 2017). On appelle cette caractéristique la capacité d'absorption du biocharbon. Cette capacité est fonction du type de biomasse pyrolysée et de la température de pyrolyse (Uzoma et al, 2011).



(Downie et al, 2009).

Figure 1 : Porosité du biocharbon.

Cette figure présente un cliché de microscopie électronique à balayage d'un biocharbon dont la surface spécifique créée par la combinaison des macropores et micropores est comprise entre 200 m²/g et 400 m²/g (Qian et al, 2015).

► Le pH

Les biocharbons peuvent influencer le pH du sol, ou la plupart ont un pH basique (entre 8 et 9,5), Il aide par conséquent à la neutralisation des sols acides (effet alcalinisant), ce qui peut être bénéfique dans les sols acides en aidant à ajuster le pH vers des niveaux plus favorables à la croissance des plantes (Wang et al, 2014).

► La capacité d'échange cationiques (CEC)

Le biocharbon est chargé négativement. Ceci lui permet de fixer des cations du sol et d'avoir ainsi une grande capacité d'échange en cation (CEC). Il retient les cations du sol par adsorption électrostatique et en restitue l'essentiel (potassium, magnésium, calcium etc.) nécessaire à la croissance de la plante (Zhang et al, 2013).

► La teneur en cendre

La teneur en cendres dans le sol peut jouer un rôle crucial dans l'amélioration de la nutrition des plantes. Les cendres résultent de la combustion de matières organiques et contiennent une variété de minéraux et d'éléments nutritifs essentiels pour les plantes, tels que le potassium, le phosphore, le calcium et le magnésium.: peuvent être absorbés par les plantes pour leur croissance et leur développement. Ces éléments nutritifs peuvent être disponibles immédiatement après l'application des cendres, ce qui peut bénéficier aux plantes, en particulier dans les sols pauvres en éléments nutritifs. (Hua et al , 2012).

1.5. Techniques de fabrication de biochar

Il existe plusieurs techniques de fabrication de biochar, chacune avec ses propres avantages et inconvénients. Parmi les techniques les plus couramment utilisées pour produire du biochar on peut citer :

1.5.1. Combustion

La combustion est le plus ancien procédé connu pour utiliser la biomasse comme matériau de production d'énergie. La combustion est un processus dans lequel l'énergie chimique stockée dans la biomasse est obtenue sous forme de chaleur par sa combustion directe en présence d'oxygène/air. La combustion assure l'oxydation complète de la biomasse. La combustion de la biomasse a lieu dans la plage de température comprise entre 800-1000 °C, récupérant presque toute l'énergie chimique disponible en énergie thermique ne laissant aucune énergie non convertie dans les gaz de combustion et très faible énergie non convertie dans les cendres (Ahmed et al, 2020). Bien que la combustion puisse être utilisée pour tout type de biomasse, elle n'est possible que si la teneur en humidité de la biomasse est inférieure à 50 % (Zhang et al, 2019). Dans la plupart des cas, la combustion directe de la biomasse n'est pas très efficace. Un prétraitement de la biomasse avant combustion augmente l'efficacité du processus de combustion (Ahmed et al, 2020).

1.5.2. Pyrolyse

La pyrolyse est un processus thermochimique dans lequel la biomasse est dégradée thermiquement dans ses constituants chimiques sous une atmosphère d'oxygène inerte ou très basse stoechiométrique. Le processus de pyrolyse se déroule dans la plage de

température de 400-1200 °C, bien que le rendement du produit dépende de divers paramètres de fonctionnement, mais généralement la basse température et le temps de résidence élevé favorisent la production du charbon (Wang et al, 2014). Selon les conditions de fonctionnement, la technologie de pyrolyse s'opère selon deux grands régimes, la pyrolyse lente et la pyrolyse rapide :

1.5.2.1. Pyrolyse lente

La pyrolyse lente est une méthode de carbonisation qui implique le chauffage de la biomasse à des températures modérées, généralement entre 300°C et 500°C, en l'absence d'oxygène ou avec un apport d'oxygène limité.

Cette méthode permet de produire du biochar de haute qualité avec une faible quantité de gaz et de goudrons. Les fours à pyrolyse lente sont souvent utilisés pour cette méthode, et ils peuvent être alimentés en biomasse de manière continue ou discontinue (Ahmed et al, 2020).

1.5.2.2. Pyrolyse rapide

La pyrolyse rapide est un processus de chauffage de la biomasse à des températures beaucoup plus élevées, généralement entre 400°C et 800°C, en présence de peu ou pas d'oxygène.

Cette méthode produit du biochar en quelques minutes, mais elle génère également des gaz de pyrolyse qui peuvent être récupérés comme source d'énergie. Les réacteurs à lit fluidisé, les réacteurs à vis sans fin, et les fours à micro-ondes sont parmi les équipements utilisés pour la pyrolyse rapide (Ahmed et al, 2020).

1.5.3. Carbonisation hydrothermale

La carbonisation hydrothermale est un processus de carbonisation à haute température (180°C à 250°C) réalisé en présence d'eau sous pression élevée. Cette méthode est souvent utilisée pour traiter les déchets organiques humides, tels que les boues d'épuration ou les déchets alimentaires. Elle produit du biochar ainsi que d'autres sous-produits tels que des liquides et des gaz (Ahmed et al, 2020).

1.5.4. Carbonisation par gazéification

La gazéification est un processus qui convertit la biomasse en gaz de synthèse en utilisant de la vapeur d'eau et/ou de l'oxygène.

Ce gaz de synthèse peut être ensuite condensé pour produire du biochar.

Cette méthode est plus complexe et nécessite souvent des équipements plus sophistiqués, mais elle peut être utilisée pour produire à la fois du biochar et de l'énergie (Ahmed et al, 2020).

1.5.5. Gazéification

La gazéification est un processus thermochimique dans lequel les contenus carbonés de la biomasse sont convertis en combustible gazeux en présence de milieu gazeux comme l'oxygène, l'air, l'azote, le dioxyde de carbone, vapeur ou un mélange de ces gaz à une température élevée comprise entre 700 °C et 900 °C (Koide et al, 2015). Contrairement à la combustion, c'est l'oxydation partielle de la biomasse qui extrait l'énergie présente dans la biomasse et la conditionne en liaisons chimiques sous forme de produits gazeux. Dans ce processus, l'énergie chimique intrinsèque du carbone présent dans la biomasse est convertie en gaz combustibles qui peuvent être utilisés plus efficacement et plus facilement que la biomasse brute (Ahmed et al, 2020). Le gaz produit par la gazéification est généralement appelé « biosyngaz ». Ce bio-syngaz se compose principalement de CO, CO₂, H₂ et N₂. Le résidu après la gazéification est du charbon solide, des cendres, du goudron et un peu d'huile (Jeffery et al, 2011).

La gazéification est une méthode très efficace pour produire du H₂ à partir de la biomasse, non seulement à l'échelle du laboratoire, mais aussi pour la production d'hydrogène à grande échelle (Li et al , 2020).

La plupart des problèmes rencontrés dans la production du biocharbon à partir de la biomasse proviennent généralement de sa composition elle-même. Il est bien connu que le rapport O/C est très important pour une haute efficacité de gazéification, un faible rapport O/C de la biomasse sur la gazéification conduit à une gazéification à haut rendement. La torréfaction est un processus qui réduit le rapport O/C de la biomasse, la torréfaction peut être considérée comme un prétraitement avant la gazéification conventionnelle pour un produit de meilleure qualité, il s'agit d'un processus à basse température qui se produit dans la plage de températures de 200 à 300 °C et un taux de chauffage d'environ 50 °C/min selon la composition et le type de biomasse (Kim et al, 2017). La porosité du biocharbon formé après torréfaction est également élevée par rapport à la gazéification conventionnelle (Ahmed et al, 2018).

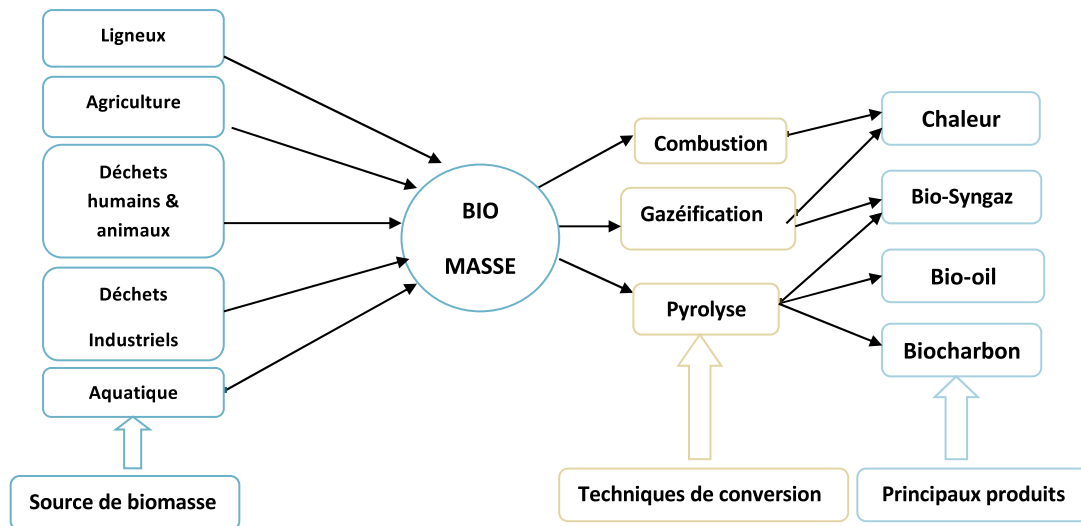


Figure 2 : Différentes techniques de conversion de la biomasse.

1.6. Formes du biochar

Le biochar est disponible principalement sous différentes formes :

- biochar en poudre

Le charbon actif en poudre prend la forme de grains de taille comprise entre 10 et 50 μm . Sous cette forme il s'utilise souvent pour le traitement de l'eau et du gaz. Dans le premier cas, il est généralement utilisé en combinaison avec un traitement clarificateur pour augmenter le temps de contact entre le charbon et l'eau (Li et al, 2020).



Figure 3 : Biochar en poudre.

1.6.1. Biochar granulé

La forme du CAG est irrégulière et sa taille comprise entre 0,2-5 nm. Il est majoritairement utilisé pour l'élimination des micropolluants organiques et de la

matière organique des eaux, mais il est également appliqué au traitement des gaz. Les caractéristiques physiques du CAG varient considérablement selon les matériaux constitutifs et le mode de fabrication (Li et al, 2020).



Figure 4 : Biohar granulé.

1.7. Les domaines d'application du biochar

Le biocharbon est peu coûteux et peut être facilement préparé à partir de diverses ressources en utilisant des procédés thermochimiques avec des applications étendues d'une manière rentable par rapport aux matériaux de pétrochimie ou d'autres procédés chimiques. Combinant ses propriétés uniques, telles qu'une surface relativement grande, un volume poreux élevé, une stabilité à long terme et des groupes fonctionnels de surface enrichis, le biocharbon peut être utilisé à de nombreuses fins, telles que le traitement des eaux usées, précurseur de catalyseurs, amendement des sols, additif pour la digestion anaérobie et le compostage et le stockage d'énergie (Zhang et al, 2019).

1.7.1. Amendement du sol

Une mauvaise gestion agricole a conduit à une augmentation des émissions de CO₂ et à une décomposition accélérée des résidus organiques du sol, des études approfondies visent à augmenter le carbone organique dans le sol en ajoutant des sources de biomasse aux résidus de cultures et aux déchets d'animaux. Cependant, la décomposition rapide de ces matières premières a limité son application.

L'utilisation du biocharbon dans l'assainissement des sols a attiré une attention croissante en raison de sa composition particulière des éléments et de la structure de sa surface, par conséquent, le biocharbon a été largement utilisé dans les aspects agronomiques comme amendement du sol dans les aspects suivants :

- Augmenter la structure du sol et la fertilité des sols dégradés ;
- Améliorer la capacité d'échange de cations et réduire la toxicité de l'aluminium ;

- Augmenter la productivité des cultures en améliorant la rétention d'eau ;
- Promouvoir la séquestration du carbone et la réduction des GES ;
- L'atténuation du lessivage des nutriments et l'augmentation de l'activité biologique (Zhang et al, 2019). Wang et al ont démontré que l'ajout de 4 % de biocharbon dérivé de la balle de riz dans le sol du jardin de thé a considérablement amélioré la qualité des propriétés acides du sol. Les niveaux de pH du sol, de potassium (K), de calcium (Ca), de magnésium (Mg), de sodium (Na), de carbone (C) et d'azote (N) totaux ont augmenté, tandis que les teneurs en aluminium (Al) et en plomb (Pb) ont diminué (Wang et al, 2014).

En général, la présence de biocharbon dans le sol (surtout dans les sols acides et non fertilisés) pourrait améliorer la qualité du sol en augmentant les éléments nutritifs, la capacité de rétention de l'eau, le pH et le rendement des cultures.

1.7.2. Additifs pour la digestion anaérobie et le compostage

En plus de l'assainissement des sols, le biocharbon produit par pyrolyse lente de la biomasse a également montré de bonnes performances en favorisant la dégradation des composés organiques, réduisant les émissions de gaz à effet de serre et la perte totale d'azote pendant le processus de compostage. Une rétention d'azote plus élevée et une meilleure stabilisation des métaux lourds ont été obtenues par l'incorporation de biocharbon dans les matériaux de compostage. De plus, le volume de matériaux de compostage a été réduit plus rapidement en raison de la minéralisation accrue du carbone, et la structure de la communauté microbienne a été considérablement modifiée, cela doit être attribué à la stabilité exceptionnelle et à la porosité élevée du biocharbon (Zhang et al, 2019).

Chapitre 02 :

La salinité

Chapitre 02 : La salinité

1. Généralité

Plusieurs facteurs environnementaux sont impliqués dans la diminution du rendement final d'un produit agricole ou dans l'altération de sa qualité. La sécheresse, le pH, la salinité, le déséquilibre des nutriments (toxicité et déficience minérale) et les températures extrêmes constituent, souvent, les principales contraintes environnementales affectant la production agricole (Uzoma et al., 2011). Le stress abiotique est donc considéré comme principal responsable des pertes associées aux cultures, en l'occurrence, la sécheresse et la salinité sont responsables de 17 et 20% de pertes, respectivement. Alors que la température élevée ou basse est causent 40 et 15% de pertes respectivement, 8% de pertes sont liées à d'autres facteurs (Usman et al., 2021).

La salinité est l'un des principaux stress abiotiques affectant la croissance et la productivité des plantes dans les régions arides et semi-arides (Solaiman et al., 2014). C'est un facteur environnemental potentiel qui limite la croissance et la productivité des plantes (Johnson et al, 2018). D'après la FAO (Food and Agriculture Organisation), on estime que plus de 831 millions d'hectares de terres dans le monde sont touchés par la salinité (Williams et al, 2019).

1.1. La salinité

La salinité est une caractéristique naturelle des sols, mais la salinisation est particulièrement causée par l'activité de l'homme. La salinité est par définition l'accumulation des sels solubles dans le sol ou sur sa surface. Au-delà d'une certaine concentration, elle a par conséquent la dégradation des sols réduisant ainsi leurs rendements.

La salinité et la sécheresse constituent des contraintes majeures limitant considérablement la production végétale sur 40% de la surface terrestre, notamment en région méditerranéenne (Qian et al, 2015). Actuellement, 800 millions d'hectares de terres à travers le monde sont affectés par la salinité ; 397 millions ha sont salins et 434 ha sont salins et sodiques (Wang et al, 2014).

En région méditerranéenne, la salinité constitue une contrainte dans beaucoup de périmètres de grandes cultures où la qualité de l'eau joue un rôle majeur et où la recherche de plantes

adaptées à des seuils élevés de salinité devient un impératif pour la production agricole et ligneuse.

L'Algérie, dont une grande partie des régions agricoles se caractérise par un climat aride et semi-aride, est touchée par le problème de salinité. Selon Szabolcs (1994), un milliard d'hectares est menacé dans le monde, dont 3,2 millions d'hectares dans ce pays (Prins et al, 2011).

La salinité élevée cause plusieurs types de stress à la plante comprenant l'altération de l'absorption des éléments nutritifs, spécialement des ions K et Ca ainsi que l'accumulation des ions toxiques, particulièrement Na, stress osmotique et oxydatif (Hua et al, 2012).

1.2. Genèse des sols sodiques ou halomorphes

La genèse des sols halomorphes est conditionnée par la présence de sel. L'ion sodium exerce une influence sur leur évolution qu'il se trouve à l'état de chlorure dans les solutions, ou bien à l'état d'ion sodium absorbé par le complexe absorbant (Johnson et al, 2018).

1.2.1. Origines et causes de la salinité

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels *in situ*. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène (Biederman et al, 2013).

1.2.1.1. Origine primaire

Près de 80 % des terres salinisées ont une origine naturelle, on qualifie alors la salinisation de «primaire». Dans ce cas, celle-ci est due à la formation des sels pendant l'altération des roches ou à des apports naturels externes :

- Dans les régions côtières, intrusion de l'eau salée ou submersion des terres basses.
- Inondation périodique par de l'eau de mauvaise qualité.
- Remontée d'une nappe phréatique salée près de la zone racinaire (Lehmann et al, 2011)

1.2.1.2. Origine secondaire

Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique et sont qualifiées de «secondaires». L'irrigation est la principale cause anthropique de la salinisation des sols (Usman et al, 2021) Dans environ la moitié des situations, le développement de l'irrigation

s'est accompagné de l'apparition de processus de salinisation, sodisation ou alcalinisation des sols d'importance variable. Si les situations apparaissent très diverses en raison des caractéristiques du milieu naturel, des pratiques agricoles ou de la gestion de l'eau, ces dégradations ne sont pas inéluctables et apparaissent pour l'essentiel comme la résultante de mode de gestion inappropriée des ressources en sol et en eau. L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire ; cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même une eau douce de la meilleure qualité contient des sels dissous et, si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler négligeable, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut s'avérer considérable (Qian et al, 2015).

1.2.2. Principaux sels responsables de la salinité

Les sels proviennent de la combinaison des bases (cations) et des acides (anions). Parmi ces sels, ce sont surtout NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃, CaSO₄, CaCl₂, MgSO₄, MgCl₂ que l'on rencontre dans les sols salifères. Tous les ions peuvent participer à la salinisation ; en pratique certains sont susceptibles de s'accumuler et d'être à l'origine d'une salinité excessive des terres. En effet, ce sont le sodium (Na⁺), le calcium (Ca⁺⁺), le magnésium (Mg⁺⁺), ainsi que le chlorure (Cl⁻), sulfate (SO₄⁻), carbonate (CO₃⁻), et les bicarbonates (HCO₃⁻) (Uzoma et al, 2011). (Annexe 6)

1.3. Classification et caractérisation des sols sales

La formation des sols salés est en relation étroite avec la présence de l'ion sodium Na⁺ sous l'une ou l'autre de ses formes: saline (NaCl, Na₂SO₄) ou échangeable, parfois les deux. Les sols salés sont riches en sels solubles (Sols salins) ou en sodium adsorbé (sols sodiques ou alcalins) :

- Les sols salins (Solontchaks) ont pour principales caractéristiques leur richesse en sels de sodium neutres (NaCl chlorure de Sodium, Na₂SO₄ sulfate de sodium), mais contenant également des quantités appréciables d'ions chlorites et de sulfates de sodium, calcium et magnésium. Ces sols sont généralement dominants dans les régions arides et semi - arides.
- Les sols alcalins (Solonetz) sont riches en sodium échangeable et en revanche pauvres en sels solubles (sels alcalins, carbonates et bicarbonates de sodium, Na₂CO₃ principalement). Les sols alcalins se trouvent plutôt dans les zones semi-arides et sub-humides.

Ces deux types de sols ont en fait des propriétés chimiques et physiques distinctes, d'où des effets sur les plantes, des traitements pour leur remise en valeur, une distribution géographique et une qualité des aquifères adjacents différents (Uzoma et al, 2011).

Tableau 2: Caractéristiques principales des sols salins et sodiques.

Caractéristiques	Sols salins	Sols sodiques (alcalins)
Chimiques	- Dominés par des sels solubles neutres : chlorures et sulfates de sodium, calcium et magnésium.	- Peu de sels solubles neutres, mais généralement des quantités appréciables de sels capables d'hydrolyse alcaline telle que les carbonates de sodium (Na_2CO_3).
	- Le pH de l'extrait de sol saturé généralement de moins de 8,2(8,7 dans d'autres ouvrages).	- Le pH de l'extrait de sol saturé de plus de 8,2 (ou 8,7) et atteignant souvent 9 ou 10.
	- Conductivité électrique à 25°C ; CE >4 Ms/cm.	- Conductivité électrique à 25°C CE<4 Ms/cm.
Physiques	En présence excessive de sels solubles neutres, la fraction argileuse est floculée et le sol est stable.	Un excès en sodium échangeable couplé à des valeurs de pH élevées rend l'argile dispersée et une instabilité structurale du sol.
	La perméabilité à l'eau et à l'air de ces sols est généralement comparable à ceux des sols « normaux ».	La perméabilité à l'eau et à l'air est restreinte. Les propriétés physiques de ces sols s'aggravent avec l'augmentation du pH et du sodium échangeable.
Effet sur la croissance des plantes	La croissance des plantes est affectée par l'action des sels solubles sur la pression osmotique de la solution du sol	La croissance des plantes est affectée par l'action de dispersion du sodium échangeable dégradant les propriétés physiques du sol.

	résultant en une diminution de disponibilité en eau.	
	Toxicité des ions tels que les ions Na, Cl, B, etc.	À travers le pH élève du sol causant des déséquilibres nutritionnels incluant notamment une déficience en Calcium.
		À travers la toxicité d'ions tels que les ions Na, CO ₃ , Mo, etc.
Amélioration du sol	L'amélioration des sols salins se fait par le lessivage des sels solubles dans la zone racinaire du sol. L'application d'amendements n'est généralement pas nécessaire.	L'amélioration des sols alcalins se fait essentiellement par remplacement du Sodium sur le complexe échangeable du sol par du Calcium à travers des amendements, le lessivage et le drainage des sels après réaction avec l'amendement et le Sodium échangeable.
Distribution géographique	Les sols salins dominant dans les régions arides à semi-arides.	Les sols alcalins se trouvent principalement dans les régions semi-arides et sub humides.

Tableau 3: Classe de la salinité des sols.

Classe	Conductivité de l'extrait de sol saturé (dS/m)
Non salins	0 ~ 2
Légèrement salins	2 ~ 4
Modérément salins	4 ~ 8
Fortement salins	8 ~ 16

Très fortement salins	> 16
-----------------------	------

1.4. Caractéristiques des eaux salées

Toutes les eaux naturelles contiennent des minéraux dissous et des matières gazeuses.

(Solaiman et al, 2014). L'accumulation des sels dans une eau dépend de son origine d'eau de pluie, l'eau de surface (la géologie du bassin versant, le climat, l'évaporation) et l'eau souterraines : en général, leur composition est assez variable d'une année (ou saison) à l'autre s'il n'y a pas d'interventions notables de l'homme.

Tableau 4 : Caractéristiques des eaux salées

Classe	CE en dS.m ⁻¹	Concentration en sels totaux en mg/l	Type d'eau
Non saline	< 0.7	< 500	Eau potable et irrigable
Légèrement saline	0.7 ~ 2	500 ~ 1500	Eau d'irrigation
Modérément saline	2 ~ 10	1500 ~ 7000	Première eau de drainage et eau souterraine
Très saline	10 ~ 25	7000 ~ 15 000	Seconde eau de drainage et eau souterraine
Très fortement saline	25 ~ 45	15 000 ~ 35 000	Eau souterraine très salée

Saumure	>45	>45 000	Eau de mer
---------	-----	---------	------------

(Ahmed et al,2020)

2. Effet de la salinité sur les plantes

La salinité est un stress abiotique complexe qui affecte directement la croissance des plantes (Qian et al.,2016). Ces dernières sont classées en deux groupes, les glycophytes et les halophytes selon leurs capacités à survivre dans des conditions salines. Le développement des glycophytes est négativement affecté par le sel tandis que, les halophytes tolèrent des concentrations élevées en NaCl (Zhang et al,2019).

La concentration élevée des différents ions de sel dans le sol, principalement le sodium et le chlore mais aussi d'autres ions (potassium, calcium, carbonate, nitrate, sulfate) provoque une diminution dans l'acquisition de l'eau par les racines des plantes (Motalebnejad et al, 2023). Le NaCl à fortes teneurs affecte la croissance, le métabolisme et la disponibilité des nutriments qui inhibe à son tour la photosynthèse par la dégradation des pigments ; chlorophylles a et b (Glaser et al, 20).

2.1. Effet de la salinité sur la germination

L'un des effets délétères du stress salin est la diminution du taux de germination et l'inhibition de la croissance, ce qui affecte le poids de la matière sèche (Jones et al.,2019). Les concentrations élevées en sel réduisent le potentiel hydrique, il en résulte ainsi une diminution de l'absorption de l'eau par les graines (Qian et al, 2015).

2.2. Effet de la salinité sur l'absorption d'eau et de nutriments

Les fortes concentrations en Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} et Cl^- réduisent la disponibilité en éléments nutritifs ; inhibent le transport et saturent les sites de fixation des ions. La compétition et les interactions entre le chlore et les nitrates, le sodium et le calcium et le sodium et le potassium conduisent à un déséquilibre ionique, une déficience en nutriments et/ou une toxicité ionique (Zhan et al, 2013). D'après (C. Lee et al, 2018), Le NaCl affecte la croissance des plantes par l'accumulation des ions à des niveaux toxiques, ce qui conduit à la diminution de la disponibilité de l'eau et de nutriments.

L'augmentation des quantités de Na^+ et de Cl^- dans le sol affecte la disponibilité des nutriments indispensables par la compétition entre les ions et par la modification de la sélectivité des membranes. Les ions Na^+ atténuent l'influx intracellulaire des ions K^+

et l'acquisition de cet élément essentiel par les cellules (Koide et al, 2015). La salinité (dominée par les ions Na^+) réduit également la disponibilité des ions Ca^{+2} , ce qui affecte la structure et la composition des organes végétatifs et reproductifs (Ahmed et al, 2020).

2.3. Génération des espèces d'oxygénées réactives

Les teneurs excessives de NaCl provoquent un déséquilibre ionique et un stress hyperosmotique chez les plantes. Ceci induit un deuxième type de stress ; l'endommagement ou le stress oxydatif (Kim et al, 2017). Le stress salin provoque la génération des EOR au niveau des chloroplastes causant l'oxydation des lipides, la dégradation des protéines, l'inactivation des enzymes et la perméabilité des membranes (D.Patel et al, 2017).

2.4. Inhibition de la photosynthèse

La photosynthèse est considérée comme la première source de production de la matière sèche chez les plantes. La sénescence précoce des feuilles réduit considérablement le rendement agricole (Lehmann et al, 2011). La salinité est l'un des facteurs majeurs qui inhibent la photosynthèse elle provoque la fermeture des stomates, ce qui réduit la transpiration et empêche l'absorption de l'eau par les différents tissus de la plante (Jeffery et al, 2011). L'accumulation d'ions toxiques, la réduction des nutriments, la génération des espèces oxygénées réactives, la peroxydation des lipides et la perméabilité des membranes provoquent tous la sénescence des feuilles (Kim et al, 2017).

.

Partie expérimentale

Chapitre 01 :

***Matériel* et Méthodes**

Partie expérimentale

Chapitre 01 : Matériel et méthodes

Notre objectif porte sur la contribution à la mise en place d'un bio-engrais à base de biocharbon et d'évaluer ces potentialités à booster et stimuler la germination et croissance des plantes de l'orge (*Hordeum vulgare* L) et la laitue (*Lactuca sativa*) cultivés en condition de stress salin.

Pour parvenir à cela, nous avons préparé le biochar par pyrolyse à différentes températures et durées. Cette partie est consacrée à la présentation de l'ensemble du matériel et des protocoles expérimentaux que nous avons utilisés au cours de nos travaux. Dans la première partie, sont précisées l'origine et la nature des matières premières qui ont servi de support à l'étude. Nous présentons, par la suite une description des techniques de fabrication et dilution qui ont été utilisées ainsi que les analyses physico-chimiques effectuées. Une troisième partie est consacré au détail de tous les essais d'évaluation des extraits aqueux de biochar. Enfin une dernière partie présente l'ensemble des résultats et leur discussion.

L'expérimentation a été conduite à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret au niveau de laboratoire de physiologie végétale, de la faculté des sciences et de la nature et de vie.

1.1. Matériel végétal

Les semences d'orge (*Hordeum vulgare* L) variété Saida utilisées dans les essais de germination ont été fournies par la Coopérative des Céréales & des Légumes Secs CCLS Tiaret. Les graines d'orge sont choisies en raison de leur faculté germinative élevée, pour la facilité de manipulation au laboratoire. Les semences de la laitue (*Lactuca sativa*), utilisées pour l'expérimentation ont été acheté auprès d'un fournisseur de matériel agricole. Il s'agit des semences certifiées de la variété *tetue de nimes* origine de Chine. Les graines de laitue sont sélectionnées en raison de leur sensibilité accrue (espèce frileuses) et à leur réactivité aux conditions environnementales et à divers stress abiotiques.

1.2. Matériel de laboratoire

Le matériel de laboratoire utilisé lors de l'expérience sont les suivants : béciers, éprouvette graduée, agitateur magnétique, balance à précision, autoclave, boîtes de Pétri, autoclave, étuve, Four, pince en bois, gants.

1.3. Préparation de biochar

Matière première, composé de déchets d'élagage d'arbres qui ont été collectés au sein de la faculté SNV. Les branches ont été broyées en petits fragments à l'aide d'un broyeur électrique. Puis la pyrolyse a été réalisée dans un four à moufle à différentes températures (300, 400 et 500 °C) et pour des durées variées (3, 4 et 5 heures). Pour chaque condition expérimentale, environ 100 g de fragments de bois broyés ont été placés dans un creuset fermé et introduits dans le four préchauffé. La température a été maintenue constante pendant la durée de pyrolyse souhaitée. Une fois la pyrolyse terminée, le four a été éteint et refroidi lentement. Le biochar produit a été ensuite tamisé et stocké dans des récipients hermétiques. Neuf (9) types de biochar ont été obtenus.

1.4. Préparation de l'extrait aqueux à froid

Dans une fiole, 20 g de poudre de chaque type de biochar ont été mélangée à 250 ml d'eau distillée. Le mélange a été homogénéisé sous agitation magnétique pendant 24 h à température ambiante pour l'extraction des composés hydrosolubles.

Après la période d'agitation, le mélange a été filtré pour séparer les particules solides de la solution aqueuse.

L'extrait aqueux préparé à base de biochar (solution mère) a été dilué dans de l'eau distillée selon trois concentrations :

- 25 % : 20 ml de solution mère + 60 ml d'eau distillée
- 50 % : 40 ml de solution mère + 40 ml d'eau distillée
- 100 % : 80 ml de solution mère.
- Temoin : 0 ml de solution mère + 80 ml d'eau distillée

Schéma explicatif du test de l'effet de différents biochars sur la germination de laitue.

Tableau 5 : Schéma explicatif des différents extraits de biochar préparés.

Température  (°C)	Durée  (heures)	Biochar 	Dilutions (%)
300	3	B1a	Témoin ;25 ;50 ;100
	4	B1b	Témoin ;25 ;50 ;100
	5	B1c	Témoin ;25 ;50 ;100
400	3	B2a	Témoin ;25 ;50 ;100
	4	B2b	Témoin ;25 ;50 ;100

	5	B2c	Témoin ;25 ;50 ;100
500	3	B3a	Témoin ;25 ;50 ;100
	4	B3b	6,25 ;12,5 ;25 ;50 ;100
	5	B3c	6,25 ;12,5 ;25 ;50 ;100



Figure 5 : Différentes étapes de préparation des extraits de biochar.



Figure 6 : Préparation des milieux de culture pour le test germinatif.

1.5. Mode d'applications de biochar

La préparation des boîtes de Pétri a été réalisée en utilisant différentes dilutions pour élaborer un milieu de culture à base d'agar-agar. Pour ce faire, nous avons ajouté 0,80 gramme d'agar dans chaque flacon contenant 80 ml d'extrait de biocharbon. Le mélange a ensuite été chauffé sur un agitateur magnétique à 500 tours par minute et à une température de 80 °C afin d'assurer la dissolution complète de l'agar et une distribution homogène des composants dans le milieu.

Lorsque la solution commence à bouillir, celle-ci doit être retirée de la plaque chauffante et laissée à refroidir pendant 30 minutes. Ensuite, la solution refroidie est coulée dans une boîte de Pétri de 90 mm de diamètre, à une hauteur de 4 mm, et laissée à solidifier sur la paillasse.

1.5.1. Effet des extraits de biochar sur la germination

L'expérience d'amorçage de la germination a été réalisée dans des boîtes de Pétri ensemencées par les graines des deux espèces. Les graines sont désinfectées à l'hypochlorite de Sodium à 0.5% durant quelques minutes (3 min), puis rincées à l'eau distillée 3 fois. Après la stérilisation, les graines servant pour les essais de germination sont réparties en lots de 21 graines de chaque espèce boîte par boîte de Pétri.

Les cultures sont incubées à l'obscurité dans une étuve dotée d'un thermostat assurant une stabilité thermique convenable, à $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant 10 jours où un contrôle quotidien et minutieux est effectué afin d'observer l'évolution de la germination des graines.

L'ambiance de l'étuve est maintenue humide en plaçant dans le fond de celle-ci un bac plein d'eau.

1.5.2. Dispositif expérimental

Notre dispositif expérimental est reparti en deux blocs qui constituent les deux espèces l'orge et la laitue. Chaque bloc est constitué 45 traitements (les différents types de biochar et les différentes concentrations) et chaque traitement sont répétés 06 fois. Le protocole général de cette étude est présenté dans le schéma suivant :

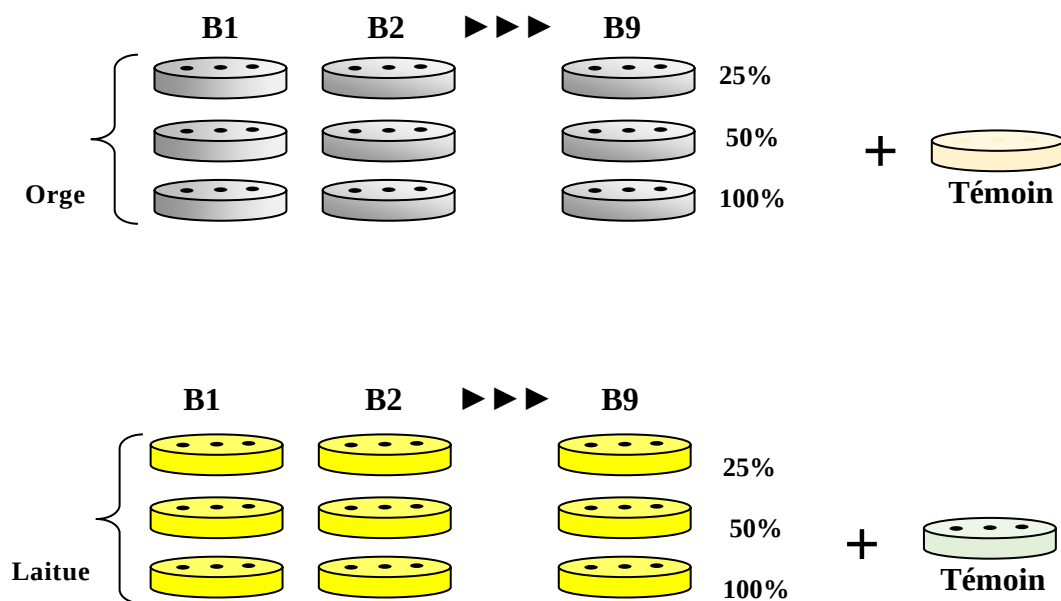


Figure 7 : Protocole du test de l'effet de différents types de biochars sur la germination.



Figure 8 : Photo du dispositif du test germinatif.

Dès l'apparition de la pointe de la radicule à travers les enveloppes, nous avons procédé régulièrement au comptage des graines germées.

1.5.3. Effet de la poudre biochar sur la croissance

Pour évaluer l'impact du biochar sur la croissance des plantules de deux espèces (l'orge et la laitue), différentes quantités de biochar broyé finement ont été mélangées à du sable extrait de la région de Ain Deheb qui est désinfecté et séché à 200°C pendant 1 heure.

Pour chaque gobelet, un mélange de poudre de biochar et de sable d'un poids total de 50 grammes par gobelet a été préparé selon les modalités suivantes :

- Concentration 2% : Mélanger 1 g de biochar avec 49 g de sable.
- Concentration 4% : Mélanger 2 g de biochar avec 48 g de sable.
- Concentration 8% : Mélanger 4 g de biochar avec 46 g de sable.
- Témoin : 50 g de sable.

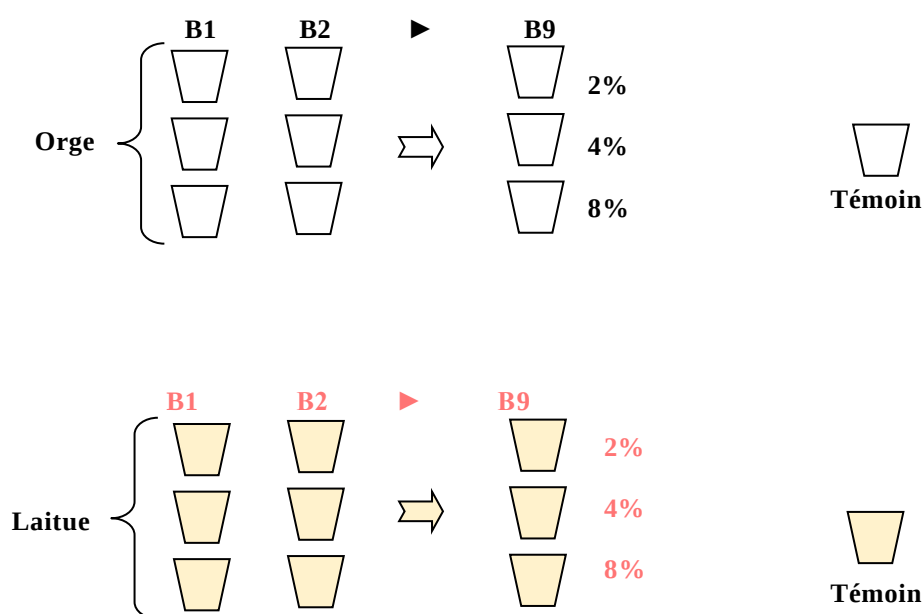


Figure 9 : Les différentes étapes de l'expérience de croissance.



Figure 10 : Photo du dispositif de l'expérience de croissance.

Des gobelets en plastique ont été utilisés, avec trois gobelets pour chaque concentration, ce qui donne un total de 162 gobelets par espèce (9 types de biochar $\times$ 3 quantités $\times$ 6 gobelets de répétition).

Pour chaque concentration, cinq graines de laitue par gobelet et quatre graines d'orge par gobelet ont été semées. Après le semis, les gobelets ont été arrosés tous les trois jours à raison de 5 ml d'eau distillée.

1.5.1. Effet de biochar sur la croissance sous stress salin

Cette partie a pour objectif de mettre en évidence l'effet des biochar sur la germination et de la croissance de l'orge (*Hordeum vulgare* L.) cultivé sous stress salin.

La culture des plantes de l'orge a été réalisée dans des pots en PVC d'une capacité de 2,5 kg, ayant une hauteur de 14 cm. Afin de laisser drainer l'eau en excès et éviter l'asphyxie des plantules, le fond des pots a été perforé, puis tapissé de 300 g de gravier fin.

Avant l'installation des cultures, le sol utilisé a subi un tamisage afin d'éliminer les débris végétaux, animaux et gravier. La fraction fine du sol obtenue a été partagée en quantités égales, à savoir 1,2kg par pot.

Chaque série de pots reçoit une quantité de biocharbon et elles sont soigneusement mélangées puis semer à raison de 8 graines d'orge par pot à une profondeur de 1 cm avec un léger tassement, puis immédiatement arrosées avec les différentes solutions pour permettre un bon contact sol –graine.

Les pots ainsi préparés ont été placés sous serre. L'irrigation a été faite de manière à maintenir le sol dans une humidité suffisante et éviter tout stress hydrique durant l'expérimentation.



Figure 11 : Photo illustrant l'expérience de la croissance sous stress salin.

Le stress salin a été appliquée après la levée des plantules, a raison de 5.84g/l (100 meq de sels/L) de NaCl. Les graines de l'orge sont réparties sur deux blocs dont un est considéré comme témoin. Qui est arrosées avec de l'eau de robinet.

1.6. Paramètres étudiés

1.6.1. Taux de germination

Le taux de germination c'est le pourcentage de graines pour lesquelles le germe est sorti dans un temps donné, c'est une mesure importante pour l'évaluation de la vigueur et la tolérance aux conditions environnement.

Dans notre cas, nous avons considéré qu'une graine a germé lorsque la radicule a percé l'enveloppe et est devenue visible à l'œil nu selon la définition de COME (1970).

Le taux de germination des graines relevé chaque 12 heures pendant 10 jours (toute la durée de germination) de mise en germination, est exprimé en pourcentage et représente le nombre de graines germées par rapport au nombre total des graines initialement mises en germination, à travers le rapport suivant :

$$\text{Taux de germination (\%)} = \frac{\text{nombre de graines germées}}{\text{nombre total des graines}} \times 100$$

1.6.2. Précocité de germination

En générale, chaque espèce dispose d'une précocité de germination spécifique à sa nature, car même placée dans les mêmes conditions expérimentales, le début d'apparition de la radicule à travers la membrane n'aura pas lieu en même temps chez toutes les graines (Renard, 1975).

Ce paramètre est déterminé lorsque nous observons les premières graines germées.

Dans ce cas, la précocité de la germination est exprimée par le taux des premières graines germées correspondant à l'intervalle de temps entre le semis des graines et les premières graines germées (Belkhodja, 1996).

1.6.3. Cinétique de germination

La cinétique de la germination correspond aux variations dans le temps du taux de germination des graines témoins et irriguées par les extraits aqueux de biochar avec différentes concentrations. Elle caractérise la variation dans le temps des taux de germination dès l'apparition de la première pointe de la radicule d'une des graines jusqu'à la stabilité de la germination.

Elle peut s'exprimer par :

- Le taux de germination obtenu à un moment donné.
- Le temps nécessaire à l'obtention de 50% de germination.
- Le coefficient de vélocité (CV) proposé par KOTOWSKI (1926) avec un temps moyen de germination (TMG).

$$CV = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n}{N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + \dots + N_n T_n} \times 100$$

Le temps moyen de germination (TMG) correspond à l'inverse du coefficient de KOTOWSKI (CV).

$$TMG = \frac{N_1 T_1 + N_2 T_2 + N_3 T_3 + \dots + N_n T_n}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_n}$$

N_1 = nombre de graines germées au temps T_1 .

N_2 = nombre de graines germées entre le temps T_1 et T_2

$N_3, \dots, N_n$ = graines germées au temps $T_3 \dots \dots$ jusqu'au temps T_n

Dans nos calculs nous avons retenu les deux formules de Kotowski consistant à calculer le coefficient de vélocité (CV), et le temps moyen de germination TMG.

1.6.4. Longueur moyenne de la radicule

La longueur moyenne de la radicule des grains germés (**LMR**, mm) est évaluée après 48 h, 72 h, 96 h et 120 h de traitement pour chaque concentration, en comptabilisant la longueur totale des racines pour chaque traitement et en la divisant par le nombre total de grains (germé ou pas) (BELKHODJA, 1996). La mesure est effectuée à l'aide d'une ficelle de coton, qui permet de prendre en compte les courbures de la radicule.

$$\text{LMR (mm)} = \frac{\sum \text{Longueurs des racines}}{\text{Nombre total de plantules}}$$

1.6.5. Longueur moyenne de la tige

La longueur des tiges (**LMT**, mm) sont mesurées à l'aide d'une ficelle de coton.

$$\text{LMT (mm)} = \frac{\sum \text{Longueurs des tiges}}{\text{Nombre total de plantules}}$$

1.6.6. Mesurée de matière fraîche et sèche

La mesure de la matière fraîche et sèche des plantules est une méthode couramment utilisée pour évaluer la croissance et le développement des plantes. Les plantules doivent être prélevées soigneusement, chaque plantule est pesée sur une balance de précision afin d'obtenir la masse fraîche.

Pour la mesure de la matière sèche, les plantules pesées sont placées dans des contenants appropriés (papier d'aluminium), elles sont ensuite mises à sécher dans un four à une température de 60°C pendant une durée de 48 heures. Une fois les plantules complètement sèches, chaque échantillon est de nouveau pesé sur la balance afin d'obtenir la masse sèche.

1.6.7. Détermination de la teneur relative en chlorophylles

Pour mesurer la teneur en chlorophylle totale, nous avons utilisé un chlorophylle-mètre de référence : SPAD-502Plus KONICA MINOLTA. L'appareil nous a permis de réaliser des mesures rapides de la teneur en chlorophylle sans endommager les feuilles des plantes.

Le Chlorophylle-mètre (fig.12) est un appareil permettant de mesurer les teneurs relatives en chlorophylles. Deux faisceaux (rouge et infrarouge) sont émis par la pince qui séquestre la feuille. Les faisceaux traversent la feuille et sont captés par la cellule réceptrice. L'énergie photonique est convertie en signal numérique. Le ratio des intensités de lumière rouge (650 nm, absorbée partiellement par les chlorophylles) et infrarouge (>800 nm, non

absorbée) permet de définir une teneur relative en chlorophylles (unité SPAD : *soil plant analysisdevelopment*).



Figure 12 : Détermination de la teneur relative en chlorophylle.

Chapitre 02 :

***Résultats* et discussion**

Chapitre 02 : Résultats et discussion

Pour déterminer l'effet des du biochar sur les deux espèces testées nous avons évalué quelque paramètre de germination qui est considérée comme l'étape la plus importante du cycle de développement d'une plante et durant cette étape l'influence du conditions environnementales sont très prescriptible.

1.1. Précocité de germination

La figure ci-dessous montre la précocité de la germination exprimée en taux de graines germées après 24 heures d'ensemencement en boîtes de Petri.

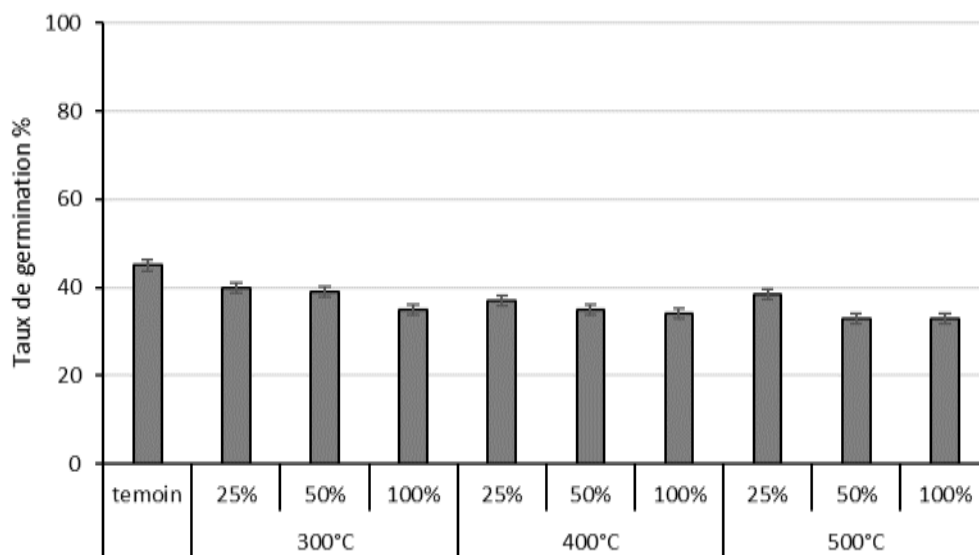


Figure 13 : Précocité de la germination des graines de la laitue.

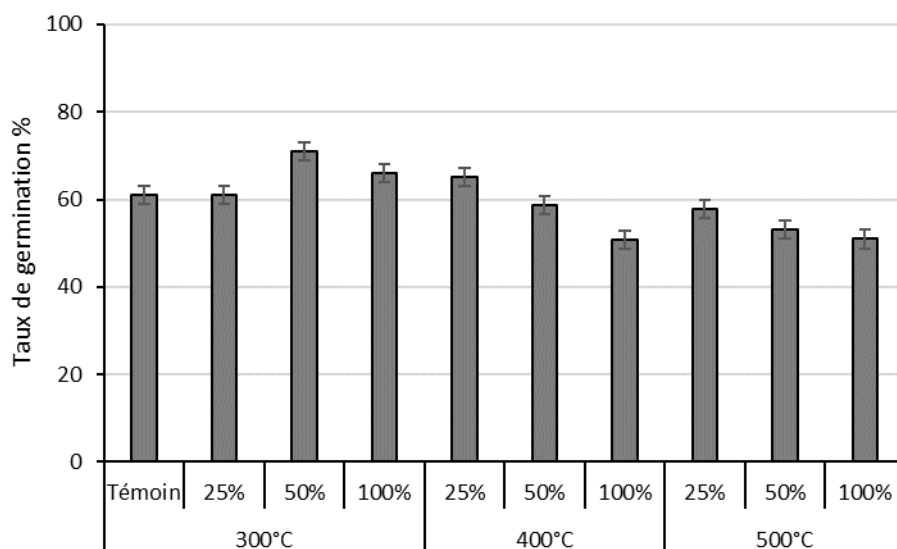


Figure 14 : Précocité de la germination des graines de l'orge.

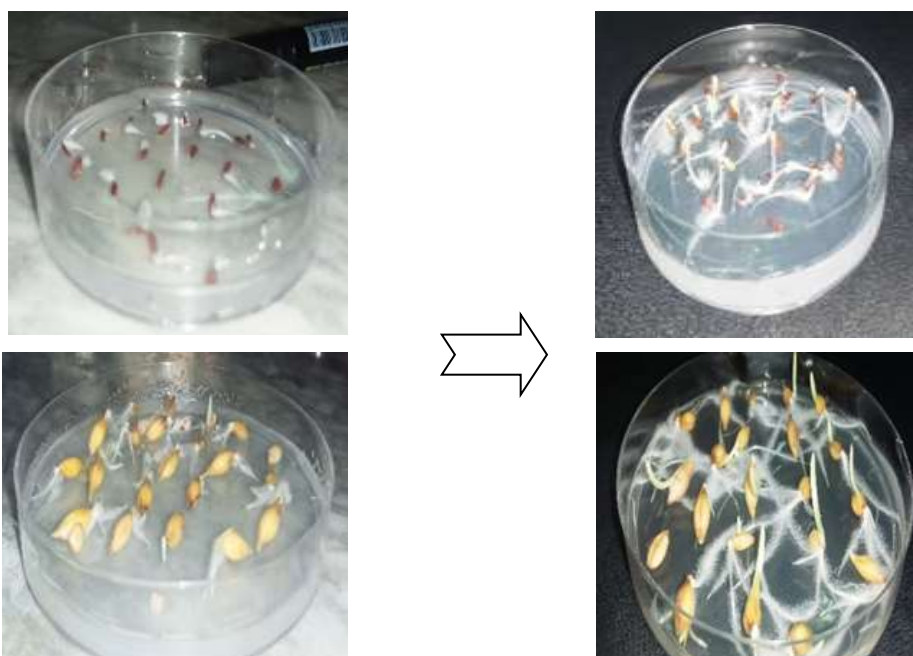


Figure 15 : Germination des graines de deux espèces en agar-agar et l'extrait de biochar.

À travers l'analyse de la précocité de germination des graines de laitue et d'orge, nous pouvons observer l'effet des différents types de biochar sur le taux de germination.

Pour les graines de laitue présentées dans la Figure 13, nous observons qu'en absence de biochar, les graines témoins germent plus précocement dès le 1^{er} jour après le semis, avec des taux qui varient entre 40%, 42%. L'ajout de biochar au milieu de culture influence négativement la précocité de germination des graines. En effet, le témoin (milieu de culture sans biochar) présente la germination la plus rapide (Taux > 40%), suivi par le biochar B1 (300°C à 25%). Les autres types de biochar, B2 (400°C) et B3 (500°C), ont

tous enregistré des valeurs inférieures à celles du témoin (Taux < 40%), indépendamment de la concentration de l'extrait dans le milieu, qu'elle soit de 50% ou 100%. De plus, il ressort de la Figure 13 que les concentrations les plus faibles de l'extrait de biochar ont toujours enregistré des taux de germination élevés indépendamment du type de biochar, le taux de germination diminue légèrement à mesure que les concentrations de l'extrait augmentent.

Pour les graines d'orge (figure 14), l'ajout du biochar B1 (300°C) a considérablement amélioré le taux de germination, des valeurs supérieures à celles du témoin ont été enregistrées avec 61%, 71% et 66% respectivement pour les trois concentrations de 25%, 50% et 100%.

Il est à noter que cette tendance se poursuit avec le biochar B2 (400°C), mais uniquement avec la plus faible concentration de 25%, où le taux de germination enregistré était supérieur à 65%. En revanche, à partir de la concentration de 50%, le taux de germination diminue et se révèle plus faible par rapport au témoin.

En présence de biochar B3 (500°C), la précocité de germination chute significativement, les graines d'orge démarrant leur germination avec un taux réduit, inférieur à celui du témoin, et ce pour l'ensemble des concentrations utilisées (25%, 50% et 100%), toutes inférieures à 60%.

1.2. Taux de germination final

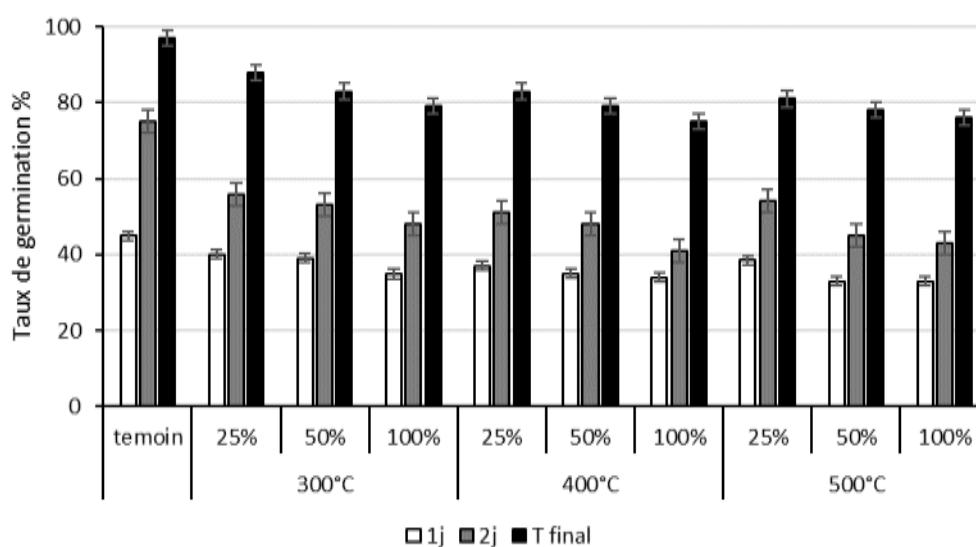


Figure 16 : Effet des extraits aqueux sur le taux de germination de la laitue.

Les résultats obtenus révèlent que l'ajout des différents types de biochar a affecté négativement le taux final de germination de la laitue. Comparées au groupe témoin (sans biochar), les plantules exposées au biochar ont présenté des taux de germination significativement plus faibles.

Les résultats indiquent que pour les trois types de biochar (B1, B2 et B3), la plus faible concentration appliquée (25%) a permis d'obtenir un taux de germination final supérieur à 80%. Cependant, pour les concentrations plus élevées (50% et 100%), le taux de germination final dépasse rarement 80%.

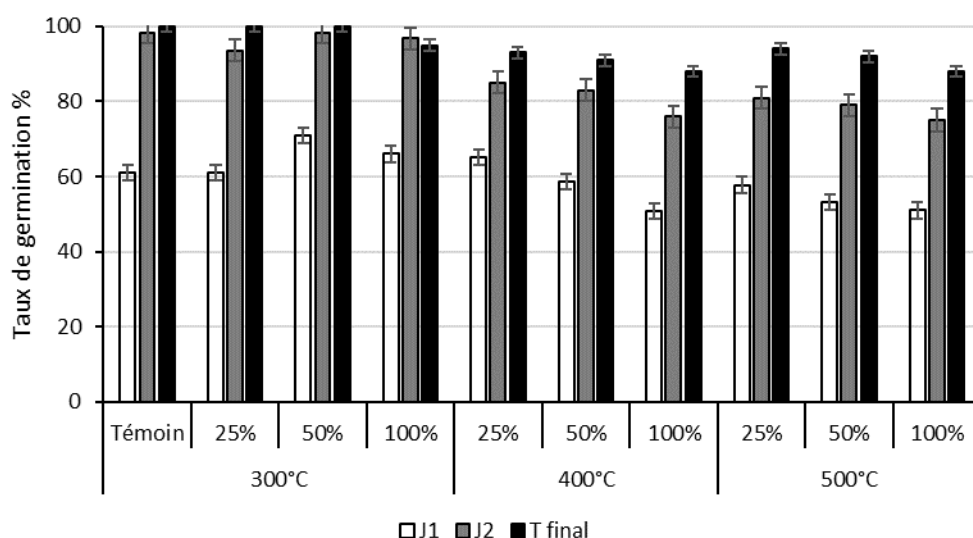


Figure 17 : Effet des extraits aqueux sur le taux de germination de l'orge.

La figure n° 17 montre que, le biochar a diminué le pourcentage de germination des graines de l'orge par rapport au témoin, à l'exception des biochars préparés à 300°C qui ont montré un effet positif sur le taux final de germination et ce pour les deux concentration 25% et 50% qui ont enregistré un taux de 100 %.

Ces résultats contrastent avec certaines études antérieures qui ont montré un effet positif du biochar sur la germination d'autres espèces végétales. Il est possible que l'effet du biochar sur la germination soit dépendant de l'espèce végétale en question et des caractéristiques spécifiques du biochar utilisé (Hansen, et al. 2014).

1.3. La cinétique de germination

La cinétique de la germination correspond aux variations dans le temps du taux de germination des graines des espèces testées.

Tableau 6 : Détermination des TMG et CV pour les graines de laitue.

TMG (j)	Dilutions		
	D25%	D50%	D100%
300°C	3,22	3,06	3,27
400°C	3,43	3,38	3,51
500°C	3,2	3,24	3,26
Témoin	3,22		
CV	D25%	D50%	D100%
300°C	30,91	32,66	30,51
400°C	23,12	29,52	28,46
500°C	31,16	30,76	30,65
Témoin	31,05		

L'étude de la cinétique de germination des graines de laitue pour différentes dilutions (25, 50 et 100%) et type de biochar (B1, B2 et B3), a montré que TMG a varié significativement entre les différents types de biochar. Les valeurs de TMG pour le biochar B3 étaient proches de celles du témoin (sans biochar) avec un délai de germination des graines de 77 heures (3.22jours), tandis que les valeurs pour les biochars B1 et B2 révèlent un temps de latence parfois plus élevées ce qui rallonge dans certains cas le délai de germination.

En ce qui concerne le CV, il a également varié selon le type de biochar. Des valeurs similaires à celles du témoin ont été observées pour le biochar B3, tandis que les biochars B1 et B2 ont présenté des CV plus ou moins éloigné du témoin.

Tableau 7 : Détermination des TMG et CV pour les graines d'orge.

TMG (j)	Dilution		
	D25%	D50%	D100%
300°C	3,99	3,93	4,07
400°C	4,06	4,02	4,084
500°C	3,97	4,036	4,059
Témoin	3,99		
CV	D25%	D50%	D100%
300°C	25	25,41	24,53
400°C	24,6	24,81	24,48
500°C	25,15	24,72	24,63
Témoin	25,04		

On constate d'après les données représentées dans le tableau 7 que les délais moyens de germination dans tous les cas oscillent autour de 84 heures après le semis soit 3 à 4 jours. L'effet de type de biochar sur le TMG n'est pas clair d'après ces données, par contre l'effet de dilutions montre différence notable, avec TMG plus faible pour la dilution D25%.

Concernant CV, d'une manière générale, les résultats révèlent que des valeurs inférieures au témoin ont été enregistrées pour l'ensemble des biochars. Une analyse des résultats révèle que lorsque les graines sont soumises à différents types de biochar leur CV évolue positivement mais demeure seulement fonction de l'espèce végétale.

Pour les différents types de biochars, malgré un début hésitant, le taux de germination final a été proche et parfois supérieur au témoin. Cette germination hésitante pourrait être liée à une légère toxicité de biochar pyrolysé à des températures inférieures à 500°C sans toutefois nuire complètement au taux de germination final.

Les résultats indiquent que la température de pyrolyse est un facteur important qui influence la composition du biochar. Les biochars produits à des températures plus élevées sont généralement moins phytotoxiques, ce qui soutient l'hypothèse de l'influence du type de biochar (milieu de germination) sur les paramètres de germination cités par (Usman, et al., (2021).

Les travaux effectués par (Ahmed, et al., (2020) ont montré que les températures de pyrolyse élevées éliminent certains composés organiques volatils (COV) ou inhibiteurs de germination présents dans la biomasse initiale. Ces COV, produits lors de la décomposition de la matière organique, peuvent avoir des effets néfastes sur la germination des graines en perturbant les processus physiologiques de la germination.

Les résultats de (Zhang et al., (2013) s'opposent aux nôtres qui n'ont pas montré de différences entre les témoins et les autres prétraitements. Nous ne pouvons expliquer avec exactitude les causes de cette différence entre nos résultats et ceux de (Zhang et al., (2013) mais plusieurs hypothèses peuvent essayer d'expliquer ces différences parmi lesquelles nous pouvons citer les conditions dans lesquelles les deux expériences ont été menées, la matière première utilisée dans la fabrication de biochar et de l'espèce végétale utilisée.

1.4. Longueur de la racine et tige

Les données illustrées dans la figure 18 et 19 présentent l'effet de divers types de biochar sur la longueur des plantules de laitue et d'orge après huit jours de mise en culture.

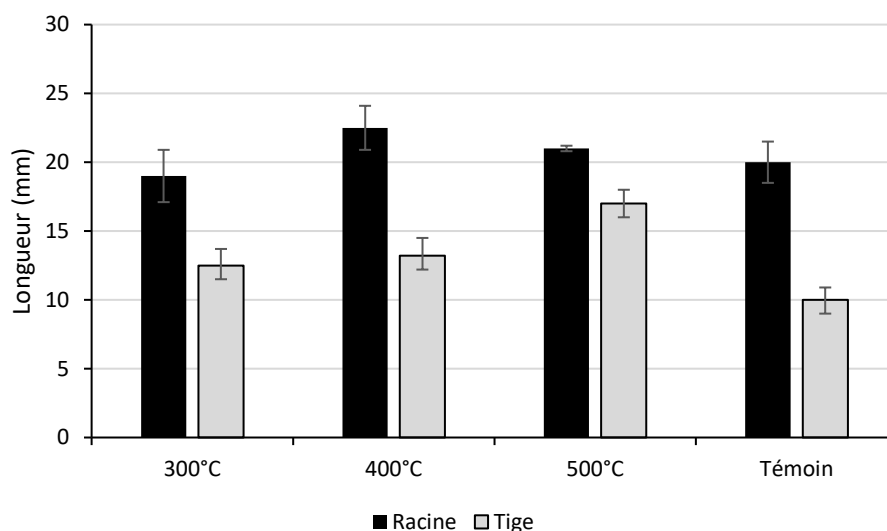


Figure 18 : Effet de différents types de biochar sur la longueur de radicelle et tige de laitue.

L'analyse des données révèle une tendance générale à l'augmentation de la longueur des racelles en présence de biochar, à l'exception du biochar B1. En effet, les biochars B2 et B3 ont permis aux racelles de dépasser le seuil de 20 mm, franchi par le témoin. En revanche, le biochar B1 n'a eu aucun effet positif sur ce paramètre, avec des valeurs enregistrées inférieures à celles du témoin.

Les résultats obtenus révèlent un effet positif des différents biochars sur la longueur des tiges, toutes les valeurs enregistrées étant supérieures à celles du témoin. Parmi les biochars testés, le B3 a permis d'atteindre la longueur de tige la plus importante, suivi du B2 et du B1.

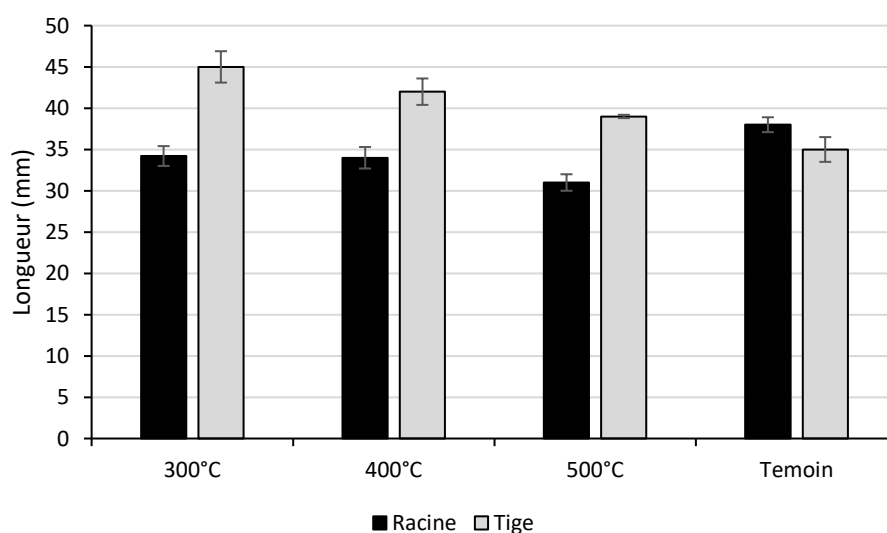


Figure 19 : Effet de différents types de biochar sur la longueur de radicelle et tige d'orge.

La figure 19 représente l'effet de différents types de biochar sur la longueur de radicelle et tige. Il ressort de cette figure que les trois types de biochar ont affectés négativement la longueur des racines des plantules de l'orge. Les résultats obtenus révèlent que la longueur moyenne des racines des plantules témoins est supérieure à 35 mm, dépassant ainsi les valeurs enregistrées avec les biochars B1 et B2. Ces derniers présentent des valeurs très proches l'une de l'autre, mais inférieures à celles du témoin. Le biochar B3 a conduit à la plus faible longueur racinaire parmi les différents traitements étudiés.

Contrairement à l'effet observé sur la croissance des racines, les biochars ont eu un impact positif sur la longueur des tiges. En effet, tous les types de biochars testés (B1, B2 et B3) ont permis d'atteindre des longueurs de tiges supérieures à celles du témoin. Les valeurs enregistrées pour les trois biochars dépassent 35 mm, indiquant une croissance significativement améliorée par rapport au traitement témoin.

Le biochar présente une structure poreuse et une surface spécifique élevée, lui permettant d'adsorber et de retenir divers nutriments essentiels pour les plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Cette capacité d'adsorption est attribuée à la présence de groupes fonctionnels chargés sur la surface du biochar, qui établissent des liaisons chimiques avec les molécules des nutriments. De plus, le biochar peut également améliorer la rétention des nutriments en augmentant la capacité de rétention d'eau du sol, réduisant ainsi le lessivage des nutriments.

L'amélioration de la fixation des nutriments dans la rhizosphère par le biochar stimule la ramification des racines par rapport à l'élongation en favorisant l'accès des racines aux nutriments essentiels, permettant aux plantes d'explorer un plus grand volume de sol et d'acquérir plus efficacement les nutriments dont elles ont besoin pour leur croissance et leur développement.

Cependant, il est important de noter que l'effet du biochar peut varier en fonction de sa composition et de ses propriétés. Dans le cas présent, le biochar B1 semble ne pas avoir fourni les conditions optimales pour la croissance des racelles.

L'effet négatif du biochar sur la longueur des racines des plantules d'orge peut s'expliquer par plusieurs hypothèses. Il est possible que les propriétés des biochars utilisés (B1 et B2) aient entravé l'absorption d'eau et de nutriments par les racines, limitant ainsi leur croissance. De plus, le biochar B3 peut avoir libéré des substances toxiques pour les racines, affectant négativement leur développement.

1.5. Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche

Les effets des différents types de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche sont indiqués dans les figures 20 et 21. Ces deux paramètres ont été mesurés pour les deux espèces végétales après huit jours de culture.

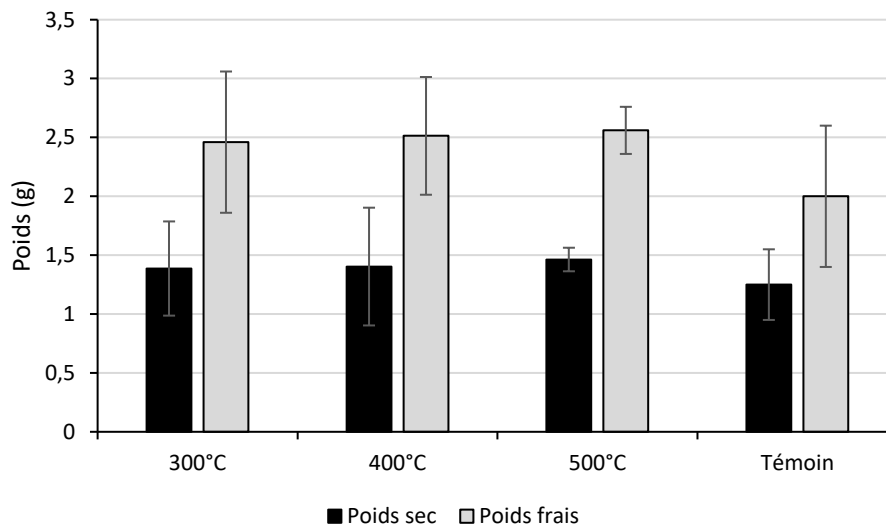


Figure 20 : Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche de la laitue.

L'analyse des résultats présentés dans la figure 20 révèle un effet positif du biochar sur la biomasse des plantes de la laitue cultivées en sa présence. En effet, une augmentation significative du poids frais et sec a été observée pour toutes les plantes traitées avec du biochar.

Concernant le poids sec, le biochar B3 a induit la plus grande augmentation, avec une valeur moyenne de 1,40 g, suivi du biochar B2 avec une valeur moyenne de 1,46 g. Le témoin, en revanche, a enregistré la valeur la plus faible pour le poids sec, avec une moyenne de 1.25 g.

Une tendance similaire a été observée pour le poids frais. Le biochar B3 a permis d'atteindre la valeur moyenne la plus élevée 2,51 g, suivi du biochar B2 avec une valeur moyenne de 2,56 g. Le témoin a enregistré la valeur la plus faible pour le poids frais, avec une moyenne de 2 g.

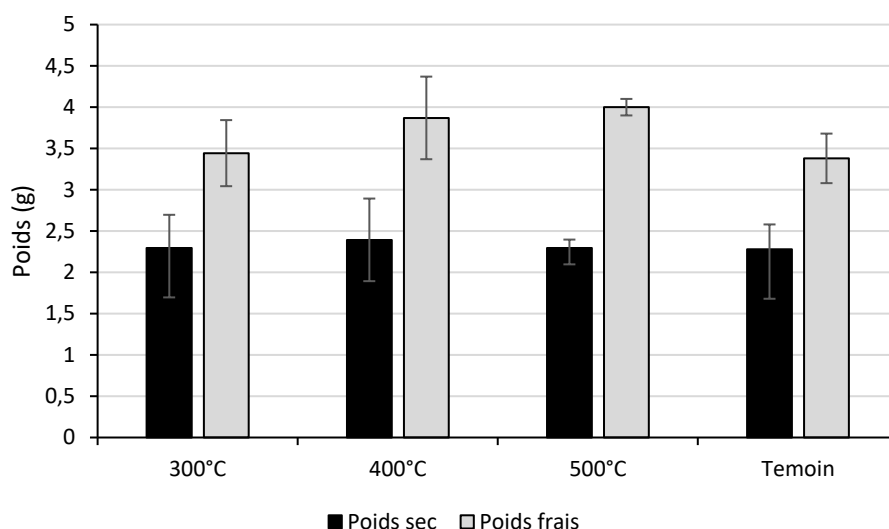


Figure 21 : Effet de biochar sur la matière fraîche et la matière sèche de l'orge.

Les résultats obtenus concernant la teneur en matières fraîches des plantes de l'orge révèlent une valeur maximale de 4 g enregistrée pour le biochar B3. En revanche, le témoin a présenté la valeur la plus faible avec 3,38 g. Les biochars B1 et B2 ont affiché des valeurs similaires, toutes deux supérieures à celle du témoin mais inférieures à celle du biochar B3.

Concernant la teneur en matières sèches, le biochar B2 s'est démarqué avec la valeur la plus élevée, atteignant 2,39 g. Le témoin a enregistré la valeur la plus faible pour les matières sèches, avec 2,29 g.

Si on observe désormais les résultats obtenus avec (Uzoma et al., (2015), on remarque que, l'effet positif du biochar sur la biomasse des plantes peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Le biochar améliore la structure du sol, favorisant l'absorption d'eau et de nutriments par les racines. De plus, le biochar peut stimuler la croissance des plantes en augmentant la disponibilité de certains éléments nutritifs essentiels. Ces effets conjugués expliquent l'augmentation significative du poids frais et sec des plantes cultivées en présence de biochar.

1.6. La teneur relative en chlorophylles

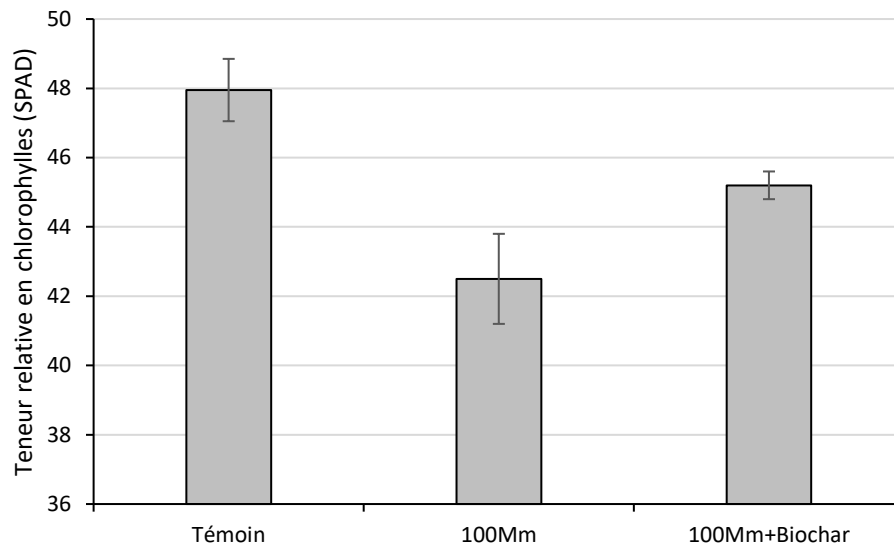


Figure 22 : Teneur relative en chlorophylles chez les plantes d'orge.

L'examen de la figure 22 montre, une diminution de la teneur en chlorophylle chez les plantes d'orge soumises au stress salin qui affichaient une valeur de 42.5 SPAD par rapport aux plantes témoins qui ont présenté une teneur en chlorophylle de 47.95SPAD. Cela suggère que le stress salin a un effet négatif sur la synthèse des pigments chlorophyllien qui sont essentiel au déroulement de la photosynthèse.

L'ajout de biochar au milieu de culture des plantes stressées par le sel semble atténuer l'effet négatif du stress salin sur la teneur en chlorophylle. En effet, on observe une augmentation de la teneur en chlorophylle par rapport aux plantes stressées sans biochar. Les plantes traitées avec le biochar ont présenté une teneur en chlorophylle de 45.2 SPAD, par rapport aux plantes stressées sans biochar qui affichaient une valeur de 42.5 SPAD. Bien que cette augmentation soit modeste, elle suggère que le biochar pourrait jouer un rôle protecteur contre les effets néfastes du stress salin sur les plantes d'orge.

Les résultats obtenus lors de notre étude corroborent partiellement avec plusieurs études réalisées à des conditions presque similaires. Ces études sur le comportement des espèces végétale en présence de stress salin et en présence ou absence de biochar ont montrées que le biochar pourrait jouer un rôle protecteur contre les effets néfastes du stress salin, les travaux qui ont été effectués par (Lehmann, et al., (2011) ont montré le biochar peut augmenter la capacité du sol à retenir l'eau et certains ions, ce qui peut aider les plantes à mieux supporter les conditions de sécheresse physiologique induites par le stress salin.

Selon (biederman, et al., (2013), le biochar peut absorber et relâcher lentement les nutriments dans le sol, ce qui peut aider les plantes à mieux les assimiler et à mieux résister au stress salin.

Compte-tenu des résultats obtenus par (Solaiman, et al., (2014) le biochar peut créer un habitat favorable aux microorganismes bénéfiques du sol, qui peuvent à leur tour aider les plantes à mieux absorber les nutriments et à mieux résister aux stress environnementaux.

Conclusion

CONCLUSION

L'utilisation du biochar comme amendement du sol remonte à des pratiques agricoles ancestrales. Des traces de son utilisation ont été retrouvées dans des sites archéologiques datant de plusieurs millénaires, notamment dans des régions d'Amazonie, d'Afrique de l'Ouest et d'Asie orientale.

Si l'utilisation du biochar dans l'agriculture moderne est relativement récente, son histoire millénaire témoigne de son potentiel en tant qu'outil durable pour améliorer la productivité des sols et la résilience des écosystèmes agricoles.

L'intérêt pour le biochar s'est accru ces dernières années en raison de sa contribution potentielle à l'agriculture durable et à la lutte contre le changement climatique. Des recherches scientifiques ont mis en évidence les propriétés bénéfiques du biochar pour la fertilité des sols, la croissance des plantes, la séquestration du carbone et la santé des sols.

La présente étude a permis d'évaluer l'effet de différents types de biochar sur la germination, la croissance et la physiologie de la laitue et de l'orge.

Les résultats obtenus ont révélé des effets contrastés en fonction du paramètre étudié et du type de biochar utilisé. Le biochar B1 (300°C) stimule considérablement la germination, tandis que les biochars B2 (400°C) et B3 (500°C) favorisent la croissance des plantes. Tous les types de biochar augmentent la biomasse et la teneur en chlorophylle des plantes stressées par le sel, atténuant ainsi les effets négatifs du stress salin. Les résultats obtenus suggèrent que le biochar peut avoir des effets positifs ou négatifs selon les conditions expérimentales.

Cette étude n'a pas la prétention d'être exhaustive. Elle est principalement limitée par le temps alloué pour la réalisation et le manque des références.

Le contenu est évidemment perfectible et ne constitue qu'une contribution pour répondre au mieux aux termes de références de l'étude, elle ouvre aussi la voie à de nombreuses perspectives de recherche pour approfondir notre compréhension de l'effet du biochar sur la germination, la croissance et la physiologie des plantes. Comme complément à la présente étude et comme perspectives, les points suivants nous semblent assez pertinents :

- Explorer une gamme plus large de biochars ;

- Étudier les interactions entre le biochar et d'autres amendements du sol ;
- Évaluer l'effet du biochar sur les propriétés du sol à long terme.

Références bibliographiques

1. Ahmed Awad, Khaled Abdelaal (2020). Beneficial Effects of Biochar and Chitosan on Antioxidative Capacity, Osmolytes Accumulation, and Anatomical Characters of Water-Stressed Barley Plants. *Agronomy*, 10(5), 630.
2. Ahmad, M., et al. (2018). Effet des extraits aqueux sur la germination de l'orge. *Botany Research Journal*.
3. Biederman, L. F., & Harpole, W. S. (2013). Biochar, soil quality, and crop productivity. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-013-1806-x>
4. C. Lee, J. Smith, M. Brown 2018. Impact of Improved Water and Nutrient Conditions on Barley Seed Germination
5. D. Patel, A. Johnson, L. White 2017. Responses of Barley Seeds to Enhanced Water and Nutrient Conditions
6. Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230.
7. Hua, L., Chen, Y., & Wu, W. (2012). Impacts upon soil quality and plant growth of bamboo charcoal addition to composted sludge. *Environmental Technology*, 33(1), 61–68.
8. Jones, B., et al. (2019). Effets variés des extraits aqueux végétaux sur la germination de l'orge. *Journal of Experimental Botany*.
9. Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144(1), 175–187.
10. Johnson, A., et al. "Effect of Plant Extracts on Lettuce Seed Germination at Different Temperatures." *Journal of Agricultural Science*, 2018:
11. Kim, H., et al. (2017). Effet des extraits végétaux aqueux sur la germination et la croissance de l'orge. *Plant Growth Regulation*.

12. Koide, R. T., et al. (2015). Biochar amendment of soil improves resilience to climate change. *GCB Bioenergy*, 7(5), 1084–1091.
13. Li, J., et al. (2020). Étude de l'effet des extraits aqueux sur la germination de l'orge sous différentes températures. *Agricultural Sciences*.
14. Lehmann, J., et al. (2011). Biochar and soil carbon sequestration: A review. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651323009429>
15. Motalebnejad, M.; Karimmojeni, H.; Majidi, M.M.; Mastinu, A. Allelopathic Effect of Aqueous Extracts of Grass Genotypes on *Eruca Sativa* L.. *Plants* 2023, 12, 3358.
16. Prins, R., Wayne, T., Marier, J., Geoff, A., Tim, C., Brandon, D. Design, Construction, and Analysis of A Farm-Scale Biochar Production System, *Catalyzing Innovation*, 2011, 24 26.
17. Qian, K., Kumar, A, Zhang, H et al. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42, 1055-1064.
18. Qian, L., Zhang, W., Yan, J et al. Effective removal of heavy metal by biochar colloids under different pyrolysis temperatures. *Bioresource Technology*, 2016, 206, 217-224.
19. Reguyal, F., Sarmah, A.K., Gao, W. Synthesis of magnetic biochar from pine sawdust via oxidative hydrolysis of FeCl₂ for the removal of sulfamethoxazole from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 321, 868-878.
20. Solaiman, Z. M., et al. (2014). Biochar and its influence on soil properties and crop productivity. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311932.2023.2256136>
21. Usman, M., et al. (2021). Biochar for mitigating soil salinity and enhancing crop productivity under saline conditions: A review and meta-analysis. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00380768.2021.1998924>
22. Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H et al. Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil, 2011, 60, 1798-1809.
23. Williams, B., et al. "High Temperature Effects on Lettuce Seed Germination: A Controlled Study." *Environmental and Experimental Botany*, 2019:

24. Wang, Y., Yin, R., Liu, R. Characterization of biochar from fast pyrolysis and its effect on chemical properties of the tea garden soil, 2014, 110, 375-381.

25. Zhang, S., Mohammad, A., Dong, L et al. An advanced biomass gasification technology with integrated catalytic hot gas cleaning. Part II: Tar reforming using char as a catalyst or as a catalyst support. Fuel, 2013, 112, 646-653.

26.

Zhang, Z., Zhu, Z., Chen, B., Liu, L. Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. Energy, 2019, 171, 581-598.