

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun –Tiaret–
Faculté Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie



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 : Toxicologie et Sécurité Alimentaire

Présenté par :

Aous iness
Ghedira sihem

Thème

**Etude de La phytotoxicité d'un biochar produit selon
plusieurs modalités**

Soutenu publiquement, le : 24/07/2025.

Jury :

Grade

Président: Mme. Nehila A.

MCB

Encadrant: Mme. Barouagui S.

MCB

Co-encadrant: Mme. Dahlia F.

MCA

Examineur: Mr. Boufares Kh.

MCA

Année universitaire 2024-2025

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions **Allah**, qui nous a donné la patience, le courage et la volonté nécessaires pour mener ce travail à terme.

Que la paix et les bénédictions soient sur notre premier éducateur, ﷺ, pour sa contribution inestimable à l'humanité.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à **Madame Barouagui**, notre promotrice, pour son aide précieuse, son apport constructif, ses encouragements constants, ses conseils avisés, sa grande disponibilité et, surtout, pour sa modestie qui n'a d'égal que son mérite.

Nos remerciements s'adressent également à **Madame Dahlia**, pour son aide concrète, son soutien moral et ses encouragements.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury **Mme Nehila** et **Mr. Boufares** d'avoir accepté d'assister à notre soutenance et d'évaluer ce travail.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce mémoire de fin d'études.



Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail a tous qui me sont chers.

Je dédie d'abord cette réussite à **moi-même**.

À celle qui a cru en ses rêves et a avancé pas à pas.

Je suis fière de tout ce que j'ai accompli,

Fière de chaque moment de patience et de défi surmonté.

Ce diplôme est le fruit de mes efforts,

Et je mérite de le célébrer avec fierté et gratitude.

A mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

A mes merveilleux frères **Sofian et Youcef, Anis**

Merci pour votre soutien constant votre humour contagieux. Vous êtes ma source de joie et de bonheur, je suis fière de vous avoir dans ma vie.

Au jumeau de mon âme **Hanan**

Merci d'être dans ma vie, merci pour ton soutien sans faille et ton sourire qui fait naître l'espoir dans mon cœur.

A ma chère **Marwa**

Merci d'être toujours à mes côtés, et pour ton soutien et leur amour

À toute ma famille, pour leur soutien moral et leurs encouragements constants. Et tous mes chers amis.

Et son oublier ma binôme **Ghedira Sihem** pour son partenariat, sa collaboration et son soutien tout au long de ce projet.

Aous iness



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

Je dédie d'abord cette réussite à **moi-même**. À celle qui a cru en ses rêves et a avancé pas à pas. Je suis fière de tout ce que j'ai accompli.

À ma chère mère, la raison de ma vie, en reconnaissance de sa patience, de son amour et de ses sacrifices.

À mon cher père pour son amour et son dévouement.

A mon merveilleux frère et mes sœurs **Yacine, Walid, Ikram, Amel**

Merci pour votre soutien constant votre humour contagieux.

Et je remercie ma chérie **Aous Iness** pour son partenariat, sa collaboration et son soutien tout au long de ce projet.

Ghedira sihem



Liste des figures

Figure 1: Boite des graines de la laitue.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2 : Les graines d'orge.	7
Figure 3 : Outils de préparation de biochar par les branches d'olive.	8
Figure 4 : Préparation de macérat gélosée.	9
Figure 5 : La phase de culture de l'orge et la laitue sur macérat gélosé.	9
Figure 6 : Phase de culture de l'orge et la laitue sur sable.....	11
Figure 7 : Variation des pourcentages des germination des graines d'orge sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	12
Figure 8 : Germination de l'orge sur macérat du biochargélosé.....	13
Figure 9 : Variation des pourcentages des germination des graines d'orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	13
Figure 10 : Germination de l'orge sur sable.	14
Figure 11 : Variation de la longueur des racines de plantules d'orge poussants sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	15
Figure 12 : Variation de la longueur des racines des plantules d'orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	15
Figure 13 : Variation du nombre des racines des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	16
Figure 14 : Variation du nombre des racines, des plantules d'orge sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	17
Figure 15: Variation de la hauteur de la partie aérienne des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	18
Figure 16 : Variation de la hauteur de la partie aérienne des plantules d'orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	19
Figure 17: Variation de la longueur de la gaine des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	20
Figure 18 : Variation de la longueur de la gaine des plantules d'orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	20

Figure 19 : Variation de la longueur de la feuille des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	21
Figure 20: Variation de la longueur de la feuille des plantules d’orge sur poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	22
Figure 21 : Variation du poids moyen frais des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	23
Figure 22: Variation du poids moyen frais des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	23
Figure 23: Variation du poids moyen sec des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	24
Figure 24: Variation du poids moyen sec des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	25
Figure 25 : Variation de la teneur en eau des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	26
Figure 26: Variation de la teneur en eau des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	26
Figure 27 : Variation de pourcentage de germination des graines de la laitue sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	27
Figure 28: Germination de la laitue sur macérat gélosé.	28
Figure 29: Variation de pourcentage de germination des graines de la laitue semis sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	28
Figure30: Germination de la laitue sur sable.	29
Figure 31 : Evolution de la longueur des racines de plantules de la laitue poussant sur macérat de biochar gélosé en fonction des différentes concentrations. Erreur ! Signet non défini.	
Figure 32: Variation de longueur des racines de plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	30
Figure 33: Variation du la longueur des racines des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	31
Figure 34: Variation de la longueur de la partie aérienne des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	32

Figure 35 : Variation de la longueur de la partie aérienne des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	33
Figure 36: Variation du poids moyen frais des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	33
Figure 37 : Variation du poids moyen frais des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	34
Figure 38: Variation du poids moyen sec des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	35
Figure 39 : Variation du poids moyen sec des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	36
Figure 40 : Variation de la teneur d'eau au niveau des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.	37
Figure 41: Variation de la teneur d'eau au niveau des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.	38

Liste des tableaux

Tableau 1 : Matériel de laboratoire utilisé au cours de l'expérimentation.	5
Tableau 2 : Informations générales sur le matériel biologique utilisé.	6
Tableau 3 : Préparation des différentes concentrations de macérat de biochar.	8
Tableau 4 : Préparation des différentes concentrations de macérat de biochar.	11

Table des matières

<i>Remerciements</i>	I
Liste des figures	IV
Liste des tableaux.....	VII
Table des matières.....	VIII
Introduction.....	1
Chapitre 1 : Matériel & méthodes.....	5
1. Durée et lieu de travail.....	5
2. Matériel et produits utilisés	5
2.1. Matériel du laboratoire	5
2.2. Matériel végétal.....	6
3. Protocole expérimental.....	7
3.1. Préparation de biochar	7
3.2. Évaluation de la phytotoxicité du biochar	8
3.2.1. Evaluation de la phytotoxicité du biochar en macérat gélosé	8
3.2.2. Evaluation de la phytotoxicité des biochar sur le sable	10
Chapitre 2 : Résultats et discussions	12
1. Orge	12
1.1. Germination	12
1.1.1. Macérat gélosée de biochar	12
1.1.2. Sable	13
1.2. Longueur des racines.....	14
1.2.1. Macérat gélosé de biochar.....	14
1.2.2. Sable	15
1.3. Nombre de racines.....	15
1.3.1. Macérat gélosé de biochar.....	16
1.3.2. Sable	16
1.4. Hauteur de la partie aérienne	17
1.4.1. Macérat gélosé de biochar.....	17

1.4.2.	Sable	18
1.5.	Longueur de la gaine	19
1.5.1.	Macérat gélosé de biochar.....	19
1.5.2.	Sable	20
1.6.	Longueur de la feuille.....	21
1.6.1.	Macérat gélosé de biochar.....	21
1.6.2.	Sable	21
1.7.	Poids moyen frais des plantules.....	22
1.7.1.	Macérat gélosé de biochar.....	22
1.7.2.	Sable	23
1.8.	Poids moyen sec des plantules.....	24
1.8.1.	Macérat gélosé de biochar.....	24
1.8.2.	Sable	25
1.9.	Teneur en eau des plantules.....	25
1.9.1.	Macérat gélosé de biochar.....	25
1.9.2.	Sable Erreur ! Signet non défini.	
2.	Laitue	27
2.1.	Pourcentage de germination	27
2.1.1.	Macérat gélosé de biochar.....	27
2.1.2.	Sable	28
2.2.	Longueur des racines.....	29
2.2.1.	Macérat gélosé de biochar.....	29
2.2.2.	Sable	30
2.3.	Longueur de la partie aérienne	31
2.3.1.	Macérat gélosé de biochar.....	31
2.3.2.	Sable	32
2.4.	Poids moyen frais des plantules.....	33
2.4.1.	Macérat gélosé de biochar.....	33
2.4.2.	Sable	34
2.5.	Poids moyen sec des plantules.....	34

2.5.1. Macérat gélosé de biochar.....	34
2.5.2. Sable	35
2.6. Teneur en eau des plantules.....	36
2.6.1. Macérat gélosé de biochar.....	36
2.6.2. Sable	37
Discussion	39
Conclusion	58
Références bibliographiques	60

INTRODUCTION



Introduction

La Terra Preta (qui signifie "terre noire" en portugais) est un sol très riche en matières organiques et en carbone. Elle se distingue par sa couleur noire intense, qui provient principalement de l'ajout de biochar, mais aussi de déchets organiques comme les coquilles de noix de palme, les os d'animaux et d'autres résidus organiques. Cette pratique de gestion des sols date d'au moins 2500 ans et aurait été utilisée par des cultures comme les Mayan, les Tupis, et d'autres groupes vivant dans le bassin amazonienne (Lehmann *et al.*, 1989).

Après la colonisation et l'effondrement des civilisations précolombiennes, les pratiques agricoles comme l'utilisation du biochar dans la Terra Preta ont été largement oubliées. Cependant, à partir du milieu du 20^e siècle, des chercheurs ont redécouvert ces sols particulièrement fertiles. Les travaux de chercheurs comme W.G. Sombroek (1966) et Bruce Glaser (2000) ont mis en lumière le rôle central du biochar dans ces sols et ont lancé l'intérêt pour son potentiel dans les pratiques agricoles modernes (Sombroek *et al.*, 2000).

La redécouverte de la Terra Preta a permis de comprendre l'importance de ces anciennes pratiques pour l'agriculture durable et a incité à examiner plus en profondeur les avantages du biochar dans la gestion des sols, la séquestration du carbone et la réduction des gaz à effet de serre. (Sombroek *et al.*, 2002).

Dans un contexte mondial marqué par des enjeux environnementaux croissants, la recherche de solutions pour atténuer les effets du changement climatique et améliorer la gestion des ressources naturelles est devenue une priorité. Parmi les solutions émergentes, le biochar, produit par la pyrolyse de matières organiques, suscite un intérêt croissant en raison de ses multiples bénéfices environnementaux, agronomiques et énergétiques (Lehmann & Joseph, 2015).

Depuis quelque année, cet engrais suscite l'engouement de la communauté scientifique végétale qu'elle soit en sols agricoles, artificiels ou en sols dégradés (Allaire et Lange, 2013) qui le considère comme un moyen permettant de lutter contre le changement climatique globale tout en améliorant la fertilité des sols. Cet engouement provient du fait que les biochars amélioreraient la fertilité, la teneur en eau et la vie microbienne des sols, augmentant du coup la productivité (Allaire & Lange, 2013).

Le biochar a été redécouvert dans les années 1990, est un matériau carboné issu de la pyrolyse de matières organiques, un processus thermique qui consiste à chauffer des

biomasses à haute température entre 300 C° et 700 C° en absence d'oxygène. Ce produit, de plus en plus étudié et utilisé dans divers domaines, est reconnu pour ses propriétés uniques qui en font une solution potentiellement bénéfique pour l'agriculture, la gestion des déchets et la lutte contre le changement climatique (Lehmann & Joseph, 2015).

En effet, le biochar est considéré comme un produit de valeur qui offre des possibilités d'amélioration des sols et de séquestration du carbone afin d'atténuer les changements climatiques. Il a été démontré que l'amendement au biochar influence les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Peake *et al.*, 2014).

Ce matériau, issu de la transformation de résidus agricoles, forestiers ou d'autres déchets organiques, possède une structure poreuse qui lui permet d'agir comme un excellent amendement du sol, favorisant la rétention d'eau et de nutriments, tout en améliorant la biodiversité microbienne. Mais au-delà de ses avantages agronomiques, le biochar est également un outil de séquestration du carbone, ce qui en fait une réponse potentielle au défi de la réduction des émissions de CO₂ (Lehmann *et al.*, 2006).

Les avantages du biochar ne se limitent pas aux sols agricoles : il peut également être utilisé pour la purification de l'eau, la gestion des déchets et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Son potentiel en tant qu'outil multifonctionnel attire de plus en plus l'attention des chercheurs, des agriculteurs et des décideurs politiques, soulignant l'importance de son intégration dans les stratégies de gestion durable des ressources naturelles et de lutte contre le réchauffement climatique. Dans cette optique, le biochar s'impose comme une solution innovante et prometteuse pour relever les défis environnementaux et agricoles du XXI^e siècle. (Ahmad *et al.*, 2014)

Dans le cadre de l'agriculture et de l'étude du biochar, il est essentiel de comprendre comment les plantes interagissent avec leur environnement, et en particulier comment elles réagissent aux amendements du sol, comme le biochar. En effet, les racines des plantes sont particulièrement sensibles aux modifications de la composition chimique du sol, ce qui peut affecter leur croissance et leur développement. Les effets phytotoxiques du biochar, potentiellement causés par des éléments chimiques libérés dans le sol ou des changements dans le pH, peuvent interférer avec ce processus naturel et influencer la santé des plantes (Beesley *et al.*, 2011).

La phytotoxicité désigne l'ensemble des effets nuisibles qu'une substance peut avoir sur la croissance et le développement des plantes, affectant des processus tels que la germination,

la croissance des racines, la photosynthèse et la reproduction (Jeffery *et al.*, 2017). Les effets phytotoxiques du biochar sont principalement dus à la présence de composés chimiques toxiques, tels que les métaux lourds, les acides phénoliques, ou encore la salinité induite par certaines biomasses utilisées pour sa production. En fonction de la nature du biochar, du type de sol et des conditions environnementales, ces effets peuvent se traduire par une croissance ralentie des plantes, une altération des racines, ou des anomalies dans la formation des tiges et des feuilles (Warnock *et al.*, 2007).

La phytotoxicité du biochar est un phénomène complexe, souvent influencé par plusieurs facteurs : la nature de la biomasse utilisée pour produire le biochar, les conditions de pyrolyse, la composition chimique du biochar, ainsi que les caractéristiques du sol dans lequel il est appliqué. Par exemple, des métaux lourds, comme le plomb (Pb), le cadmium (Cd), ou le cuivre (Cu), peuvent être présents dans certaines biomasses et se retrouver dans le biochar, où ils sont libérés dans le sol et interfèrent avec la croissance des racines. Par ailleurs, l'acidité ou l'alcalinité du biochar, en fonction du pH obtenu lors de la pyrolyse, peut altérer l'équilibre nutritionnel du sol, rendant certains éléments essentiels à la croissance des plantes soit plus disponibles, soit moins accessibles. (Lehmann *et al.*, 2009).

Les recherches précédentes ont montré des résultats contrastés concernant l'impact du biochar sur la croissance végétale. Certaines études suggèrent que l'application de biochar peut stimuler la croissance des racines et améliorer la disponibilité des nutriments pour les plantes, notamment dans les sols pauvres ou dégradés (Lehmann *et al.*, 2011). En revanche, d'autres études ont mis en évidence des effets négatifs, en particulier lorsque le biochar contient des concentrations élevées de métaux lourds ou des niveaux de pH trop élevés ou trop bas (Sohi *et al.*, 2010). Ces résultats montrent que l'efficacité et la sécurité du biochar dépendent en grande partie de ses caractéristiques spécifiques et des conditions dans lesquelles il est utilisé. (Lehmann & Joseph, 2015).

Cette étude a pour but d'explorer la phytotoxicité liée à l'utilisation du biochar à partir de (branche d'olive) et son effet sur la croissance et la santé des plantes (l'orge, la laitue) en se concentrant sur les divers facteurs qui influencent ce phénomène. Cela comprend l'examen de l'impact du type de matière organique d'origine (biomasse) utilisée pour la production de biochar, ainsi que des conditions de pyrolyse, telles que la température et la durée d'exposition.

L'objectif vise également à valoriser les résidus végétaux issus de la taille des oliviers, en transformant les branches en biochar à haute valeur ajoutée, utilisable comme amendement dans le domaine agricole. Cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, en permettant le recyclage de déchets organiques souvent négligés ou éliminés par des pratiques polluantes. En réutilisant ces sous-produits pour améliorer la fertilité des sols et stimuler la croissance des plantes, cette démarche contribue à réduire la pollution de l'environnement, à limiter les émissions de gaz à effet de serre et à préserver les ressources naturelles.

Chapitre I :
MATÉRIELES & MÉTHODES

Chapitre 1 : Matériel & méthodes

1. Durée et lieu de travail

Les travaux expérimentaux relatifs à l'évaluation de la phytotoxicité de biochar ont été menés du 26 janvier au 4 mars 2025, au sein du laboratoire de physiologie végétale et du laboratoire de protection des végétaux, rattachés à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret.

2. Matériel et produits utilisés

2.1. Matériel du laboratoire

L'expérimentation a nécessité l'utilisation de divers produits, instruments et équipements spécifiques, détaillés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Matériel de laboratoire utilisé au cours de l'expérimentation.

Catégorie	Matériel de laboratoire	Produits
Matériel/Produits	Plaque chauffante Boîte de Pétri Erlenmeyer Bain-marie Bécher Éprouvette graduée Fiole Entonnoir Étuve Agitateur Balance électronique Papier filtre Four à moufle	Eau distillée Agar-agar Eau de javel

2.2. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé pour l'évaluation de la phytotoxicité des biochars se compose de graines d'orge et de laitue. Les caractéristiques des variétés utilisées sont présentées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Informations générales sur le matériel biologique utilisé.

Plante	variété	origine	source
Orge	Saida 183	Locale (Algérie)	ITGC
Laitue	Tétue de Nîmes	La Chine	Sarl idéal

Les graines de laitue (Fig. 1) et d'orge (Fig. 2) sont toutes deux couramment utilisées dans les bio-essais de phytotoxicité, mais pour des raisons différentes.

a) Laitue (*Lactuca sativa*)

Elle est utilisée pour les raisons suivantes :

- ✓ Très sensible aux substances toxiques.
- ✓ Germination rapide (2–4 jours).
- ✓ Graine de petite taille, réagit vite aux conditions du sol.
- ✓ Très bon indicateur de toxicité aiguë.
- ✓ Résultats rapides et reproductibles.
- ✓ Norme souvent utilisée dans les bio-essais de laboratoire.

b) Orge (*Hordeum vulgare*)

Il est utilisé pour les raisons suivantes :

- ✓ Céréale de référence dans les sols tempérés.
- ✓ Moins sensible que la laitue, utile pour observer des effets plus subtils.
- ✓ Représente un usage agricole courant du sol
- ✓ Tolère une certaine salinité ou pH, mais montre bien les effets sur la croissance.
- ✓ Racines faciles à mesurer.
- ✓ Bon complément à la laitue pour avoir un profil complet de phytotoxicité.



Figure 1 : Les graines d'orge.

3. Protocol expérimental

3.1. Préparation de biochar

Conformément aux exigences expérimentales, le biochar est produit à partir des branches de l'olivier, en tirant parti de la période de taille qui se situe entre les mois de décembre et février, soit avant le début du printemps. Cette période, qui suit généralement la récolte des olives, est considérée comme l'une des plus propices pour tailler les arbres. L'opération vise principalement à éliminer les branches faibles ou endommagées, qui entravent le bon développement de l'arbre. Cette pratique permet non seulement d'améliorer la productivité de l'olivier, mais aussi de valoriser les résidus de taille en tant que matière première pour la production de biochar, dans une logique de gestion durable des ressources agricoles.

Avant la pyrolyse, les branches d'olives ont été soumis à un séchage. La pyrolyse a ensuite été réalisée dans des boîtes métalliques hermétiquement fermées, placées dans un four à moufle. Le processus s'est déroulé dans des conditions strictement contrôlées, avec une température de carbonisation 400 °C et trois durées de séjour (3h, 4h et 5 h). Une fois la température cible atteinte dans le four, le temps de séjour était déclenché. À la fin de la pyrolyse, les échantillons ont été retirés, laissés à refroidir, puis stockés dans des récipients en plastique hermétiquement fermés (Fig. 3).



Figure 2 : Outils de préparation de biochar par les branches d'olive.

3.2. Évaluation de la phytotoxicité du biochar

Pour évaluer la phytotoxicité des biochars obtenus, des tests de germination ont été réalisés sur des graines d'orge et la laitue. Ces essais ont été menés sur deux types de substrats distincts : des macérats de biochar solidifiés dans un milieu gélosé, et du sable.

3.2.1. Evaluation de la phytotoxicité du biochar en macérat gélosé

Le macérat de biochar a été préparé en mélangeant 20 g de biochar avec 250 ml d'eau distillée, puis en agitant la solution pendant 24 heures. Cette préparation correspond à une concentration initiale de 8 %. Après filtration, le filtrat obtenu a été dilué pour obtenir quatre concentrations différentes : 4 %, 2 %, 1 % et 0,5 % (Tableau 3).

Tableau 3 : Préparation des différentes concentrations de macérat de biochar.

Nom de l'échantillon	Concentration	Quantité de macérat utilisée	Quantité d'eau distiller ajoutée
B0 Témoin	0%	00 mL	80 mL
B1	0,5%	05 mL	75 mL
B2	1%	10 mL	70 mL
B3	2%	20 mL	60 mL
B4	4%	40 mL	40 mL
B5	8%	80 mL	00 mL

Pour chaque concentration, une gélose contenant 1 % d'Agar-Agar a été préparée. Cela a été réalisé en ajoutant 0,8 g d'Agar-Agar à 80 ml de chaque solution diluée du macérat (Fig. 4). L'ensemble a été placé sur l'agitateur pour homogénéiser l'agar agar avec macérat. Une fois solidifiées, les géloses ont été conservées à température ambiante jusqu'à leur utilisation. Chaque condition expérimentale a été réalisée en triplicata.



Figure 3 : Préparation de macérat gélosée.

La surface des graines de l'orge et la laitue a été stérilisé par l'utilisation de l'eau de javel pendant 5 minutes puis les graines ont été rincées 5 fois avec l'eau distillé.

Les graines ont ensuite été placées dans des boîtes de Petri contenant le macérat de biochar précédemment préparé, à raison de 21 graines par boîte (Fig. 5). Les boîtes de Petri ont été placées dans l'incubateur à une température de 25°C.

La germination des graines a été suivie quotidiennement et les paramètres de croissance ont été mesurés au premier, deuxième, troisième et au huitième jour de la germination.



Figure 4 : La phase de culture de l'orge et la laitue sur macérat gélosé.

Le pourcentage de germination a été déterminé après 24h, 48h et 72h à l'aide de la formule suivante :

Pourcentage de germination = (Nombre de graines germées/Nombre total de graines)*100

Au bout de 72 heures de germination, la quasi-totalité des boîtes de Pétri présentaient un taux de germination de 100 %. Cette observation nous a conduits à interrompre le comptage des graines germées et à entamer l'évaluation des paramètres de croissance.

Les paramètres de croissance évalués au troisième jour de germination incluent le nombre de radicules ainsi que la longueur des coléoptiles. Au huitième jour, les mesures ont porté sur la longueur des racines, celle des parties aériennes, ainsi que sur les poids frais et secs des plantules.

Les longueurs ont été déterminées en mm à l'aide d'une règle graduée. Le nombre et longueur de radicule a été compté manuellement. Les poids ont été déterminés à l'aide d'une balance de précision. Les poids secs ont été obtenus après séchage des plantules dans une étuve ventilée à 60° C pendant 72 heures.

3.2.2. Evaluation de la phytotoxicité des biochar sur le sable

Étant donné que le biochar solide interagit avec les composants du sol, nous avons choisi d'évaluer sa phytotoxicité en utilisant un substrat inerte, à savoir le sable, prélevé dans la région de Laghouat.

Le protocole expérimental appliqué pour évaluer la phytotoxicité du macérat de biochar incorporé dans la gélose a également été utilisé pour tester la phytotoxicité du biochar solide mélangé au sable. Une température de pyrolyse (400 °C), trois durées de carbonisation (3 h, 4 h et 5 h), ainsi que six concentrations de biochar (0 %, 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 % et 8 %) ont été étudiées dans des gobelets en plastique de 150 ml (Fig. 6). Chaque combinaison expérimentale a été réalisée en triplicat. Les modalités de préparation des mélanges biochar/sable sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4 : Préparation des différentes concentrations de macérat de biochar.

Concentrations	Modalité
Témoin	50g de sable seulement
0.5%	Mélange de 0,25 g de biochar avec 49,75 g de sable
1%	Mélange de 0.5 g de biochar avec 49,5 g de sable
2%	Mélange de 1 g de biochar avec 49 g de sable
4%	Mélange de 2 g de biochar avec 48 g de sable
8%	Mélange de 4 g de biochar avec 46 g de sable

**Figure 5 :** Phase de culture de l'orge et la laitue sur sable

Chapitre II:

RÉSULTATS & DISCUSSION

Chapitre 2 : Résultats et discussions

1. Orge

1.1. Germination

1.1.1. Macérat gélosée de biochar

Les histogrammes de la figure (7) illustrent les pourcentages de la germination de l'orge dans le macérat gélosé du biochar après 3 jours.

Au troisième jour de germination, les graines poussant sur l'eau gélosée seule (témoin) avaient des pourcentages de germination de plus de 90%. Les taux de germination de l'orge le plus élevé a été obtenus par le macérat de biochar produits à 400°C pendant une durée de pyrolyse de 4h. Ces traitements ont permis d'obtenir des taux attient à ceux des témoins. Les pourcentages de germination les plus élevés ont été obtenus chez les graines soumises à la concentration de 1% du macérat de biochar produit à 400°C pendant 3h, la concentration de 8% du macérat de biochar produit à 400°C pendant 4h et la concentration de 4% du macérat de biochar produit à 400°C pendant 5h avec des moyennes respectives de 94,26%, 61,22% et 63,21%. Les pourcentages de germination les plus faibles ont été obtenus chez les graines soumises à la concentration de 8% du macérat de biochar produit pendant 3h de pyrolyse et les concentrations de 1% du macérat de biochar produit durant 5h de pyrolyse avec des moyennes de 0% et 52,28% respectivement.

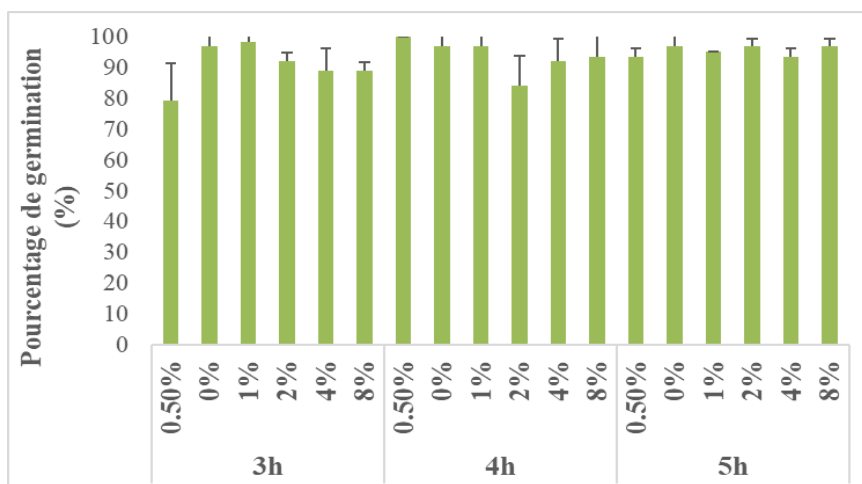


Figure 7 : Variation des pourcentages des germination des graines d'orge sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.



Figure 8 : Germination de l'orge sur macérat du biochargélosé.

1.1.2. Sable

Les histogrammes de la figure (9) illustrent les pourcentages de la germination de l'orge dans le sable du biochar après 3 jours.

Au 3eme jour de germination, les graines poussant sur sable seule (témoin) avaient des pourcentages de germination 100%. Les taux de germination de l'orge ont été obtenus par le sable de biochar produits à 400°C élevé pendant toutes les durées de pyrolyse (3h ,4h ,5h).

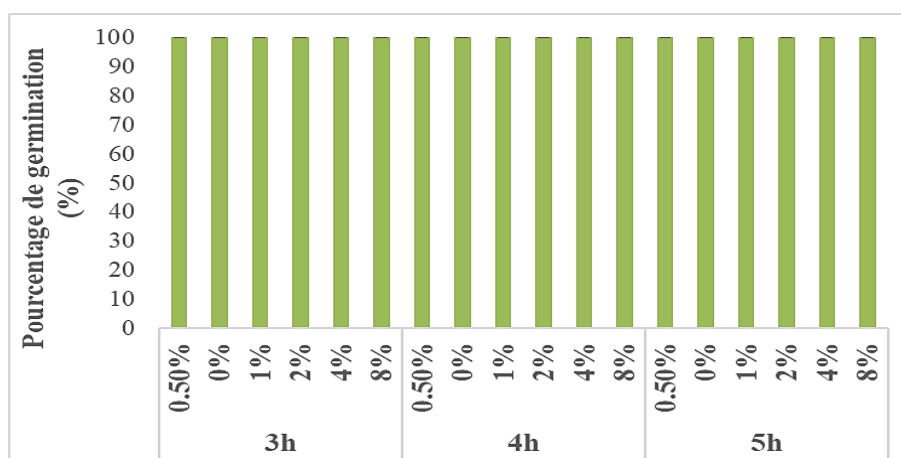


Figure 9 : Variation des pourcentages des germination des graines d'orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.



Figure 10 : Germination de l'orge sur sable.

1.2. Longueur des racines

1.2.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (11) représentent la longueur des racines de l'orge poussant sur le macérat gélosé du biochar au 8ème jour de germination.

Au huitième jour de germination, les graines considérées comme témoins avaient les racines les plus courtes avec une moyenne de 2,66 cm. La durée de séjours de biochar de 4h et la concentration de 1% ont permis d'obtenir les racines les plus longues contrairement à la durée 3h et la concentration de 0,5% qui semblent ralentir légèrement le développement des racines.

Les longueurs des racines les plus importantes ont été obtenus chez les graines poussant sur la concentration 0.5% du biochar pyrolysé pendant 5h, la concentration 2% du biochar pyrolysé pendant 4h et la concentration 4% du biochar pyrolysé pendant 3h avec des moyennes respectives de 14.03 cm et 13.33cm (Fig. 11). Les longueurs des racines les plus faibles ont été obtenues chez les graines poussant sur la concentration 0.5% du biochar pyrolysé pendant 4h avec une moyenne de 8.1 cm.

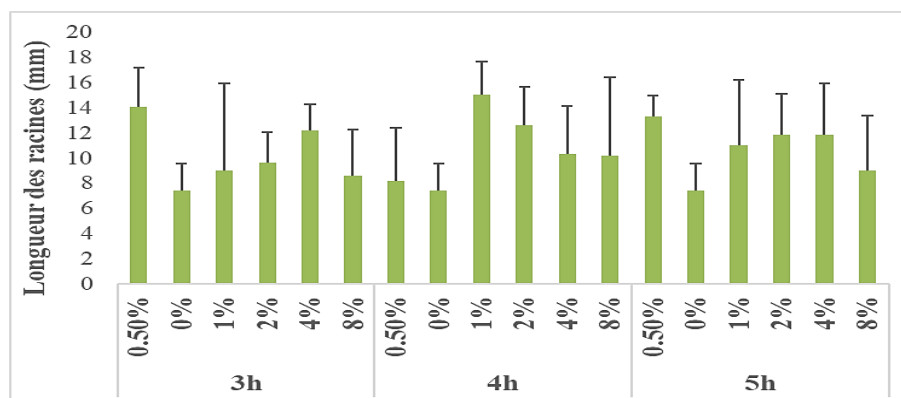


Figure 11 : Variation de la longueur des racines de plantules d'orge poussants sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.2.2. Sable

Les histogrammes de figure (12) représentent la variation de la longueur des racines de l'orge semis dans le mélange sable-biochar au 8ème jour de germination.

Il est remarquable que les graines semis dans le sable seule (témoin) avaient les racines les plus courtes (3,8 cm) au huitième jour de germination. Cependant, la durée de séjours de 4h et la concentration de biochar de 1% a permis d'obtenir des graines avec les racines les plus longues. Les longueurs des racines maximales ont été obtenues chez les graines de l'orge poussant sur le sable mélangé avec les concentrations de biochars de 0.5%, produits respectivement dans des durées de pyrolyse de 3h et 5h.

Les longueurs des racines minimales ont été obtenues chez les graines poussant sur le sable mélangé avec les concentrations de biochars de 0.5% et 8%, produits par les températures de pyrolyse de 400°C pendant 4h, 3h et 5h respectivement (8 cm, 8.05 cm et 9 cm).

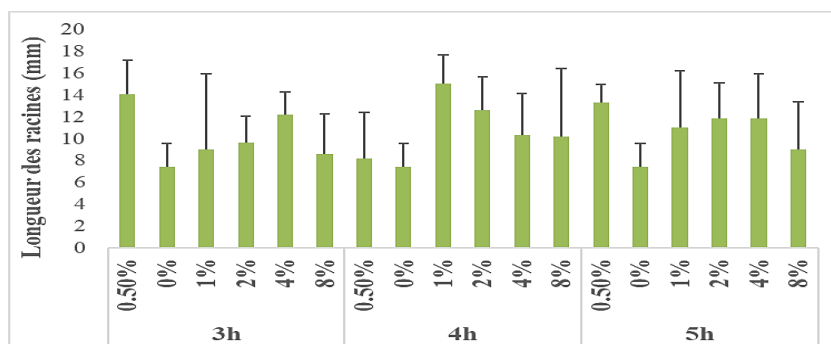


Figure 12 : Variation de la longueur des racines des plantules d'orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.3. Nombre de racines

1.3.1. Macérat gélosé de biochar

Figure 13 : Evolution du nombre des racines des plantules d'orge poussant sur macérat de biochar gélosé en fonction des différentes concentrations.

Les histogrammes de la figure (13) illustrent Le nombre des racines de l'orge dans le macérat gélosé du biochar après 3 jours.

Au troisième jour, les graines semis dans le l'eau gélosé seule (témoin) avaient le nombre des racines supérieur aux autre concentration (6 racines), sauf que dans la concentration 4% de la durée de pyrolyse 4h qui a enregistré le nombre de radicelle important 6,7 racines. La durée de séjours de biochar de 5h et la concentration de 8% ont permis d'obtenir les nombres des racines les plus faible avec une moyenne de 5,3 racines.

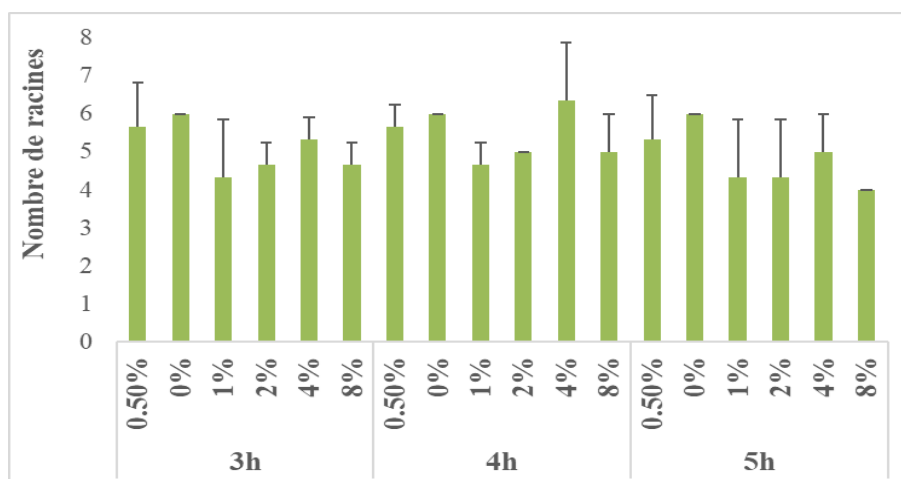


Figure 13 : Variation du nombre des racines des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.3.2. Sable

Les histogrammes de la figure (14) illustrent les variations du nombre des racines de l'orge semés dans le sable enrichie en biochar après 3 jours.

On remarque que les plantules témoin enregistré le nombre de radicelles le plus important. Tandis que l'ensemble des concentrations des biochars appliqué enregistrent des fluctuations. Le nombre des radicelles le plus important est enregistré chez les plantules poussant sur le sable enrichi de biochar d'une concentration de 4%, 8% de la durée de séjour 5h et la concentration 0,5% de la durée de séjour 3h avec une moyenne du nombre de racine de 6, 5,9 et 5,8 respectivement.

Les plantules poussant sur sable enrichie en biochar produit durant un temps de séjour de 4h et de concentration 4% enregistré le nombre des racicelles le plus faible avec une moyenne de racine.

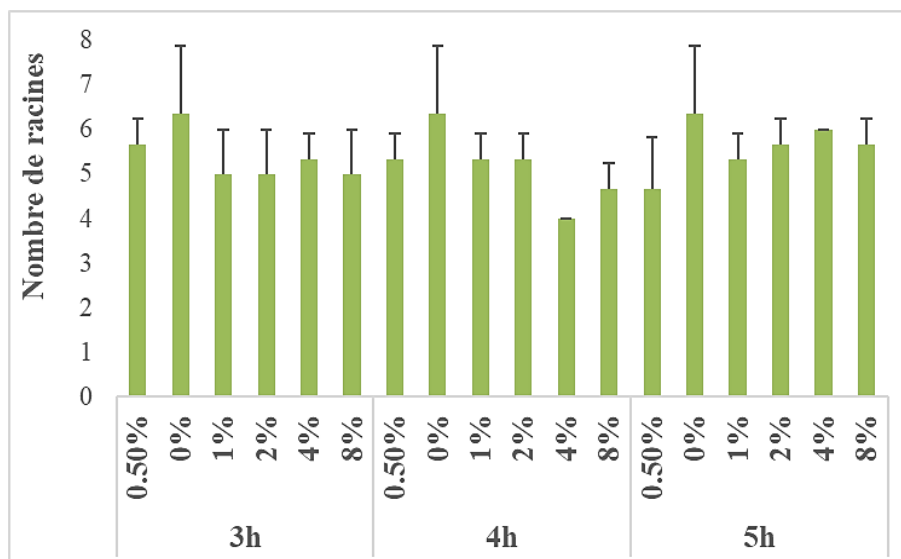


Figure 14 : Variation du nombre des racines, des plantules d’orge sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.4. Hauteur de la partie aérienne

1.4.1. Macérat gélifié de biochar

Les histogrammes de la figure (15) illustrent La hauteur de la partie aérienne (cm) de l’orge poussant sur macérat gélifié du biochar après 3 jours.

Après 3 jours de germination, les graines témoins ont enregistré les plus faibles hauteurs de la partie aérienne, avec une moyenne de 20,8 cm. L’application de biochar pyrolysé pendant 3 heures à une concentration de 4 % a permis une croissance optimale de la partie aérienne, tandis que le traitement à une concentration de 1 % avec un temps de pyrolyse de 4 heures a légèrement ralenti le développement.

Des résultats relativement faibles ont été observés pour les biochars pyrolysés pendant 3 et 5 heures aux concentrations de 1 % et 8 %, avec des moyennes respectives de 23,3cm et 14.8 cm.

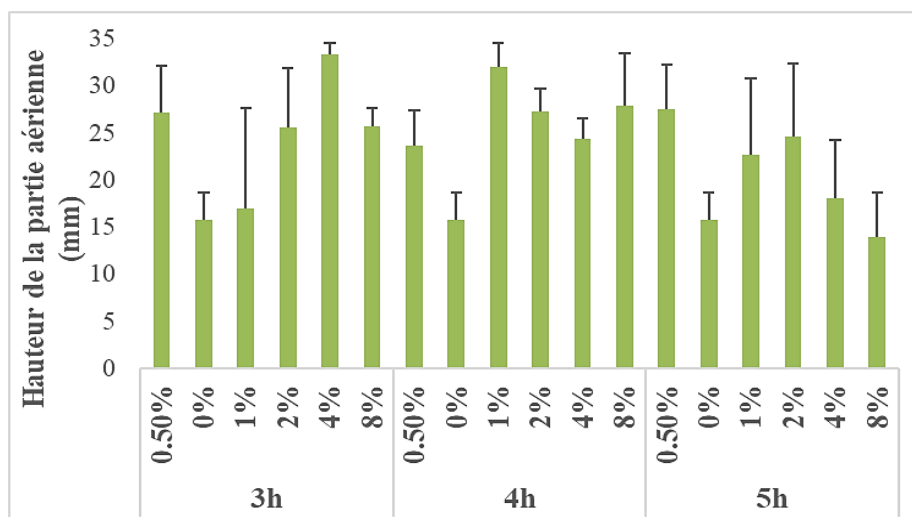


Figure 15 : Variation de la hauteur de la partie aérienne des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.4.2. Sable

Les histogrammes de la figure (16) illustrent La hauteur de la partie aérienne (cm) de l’orge poussant sur le sable du biochar après 3 jours.

Le traitement témoin, sans biochar, affiche une croissance modérée (20,8 cm), servant de base comparative.

Une amélioration nette est observée avec l’application de biochar à 1 % pyrolysé pendant 4 h, ce traitement étant qualifié de croissance optimale.

Les meilleures performances globales sont enregistrées avec les concentrations 2 % et 4% des biochars pyrolysé pendant 5h et 3h respectivement, atteignant 27.8 cm, 28.9 cm, à l’inverse, des concentrations de 8 % et 4 % d’une durée de pyrolyse de 4h et 5h entraînent une diminution de la croissance (19.7 cm), (19.9cm).

Les autres traitements intermédiaires (0,5 % et 2% avec 3 ou 5 h de pyrolyse) montrent des résultats plus variables (de 26,1 cm à 26,367 cm), sans égaler les performances optimales.



Figure 16 : Variation de la hauteur de la partie aérienne des plantules d’orge poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.5. Longueur de la gaine

1.5.1. Macérat gélosé de biochar

L’étude de la longueur de la gaine des plantules d’orge cultivées sur macérat gélosé de biochar révèle une forte influence conjointe des concentrations appliquées en fonction de la durée de pyrolyse du biochar (Fig. 17).

Les concentration 8%, 1% 4% 2% et 0.5% des biochars pyrolyse durant 3h 4h et 5h respectivement tendent à favoriser l’élongation de la gaine, indiquant une meilleure assimilation des composés bénéfiques présents dans l’extrait de biochar.

La longueur maximale de la gaine est généralement obtenue les concentration 4 % et 1% de biochar pyrolysé pendant 3h, 4h, suggérant un équilibre optimal entre la libération des nutriments et l’absence de composés inhibiteurs.

À l’inverse, des concentrations de (1% et 8 %) ou une durée pyrolyse de (3, 5 heures) respectivement, sont souvent associées à une réduction significative de la croissance de la gaine. Cette inhibition pourrait résulter d’un excès de substances toxiques résiduelles ou d’une surcharge du milieu en cendres ou composés solubles indésirables.

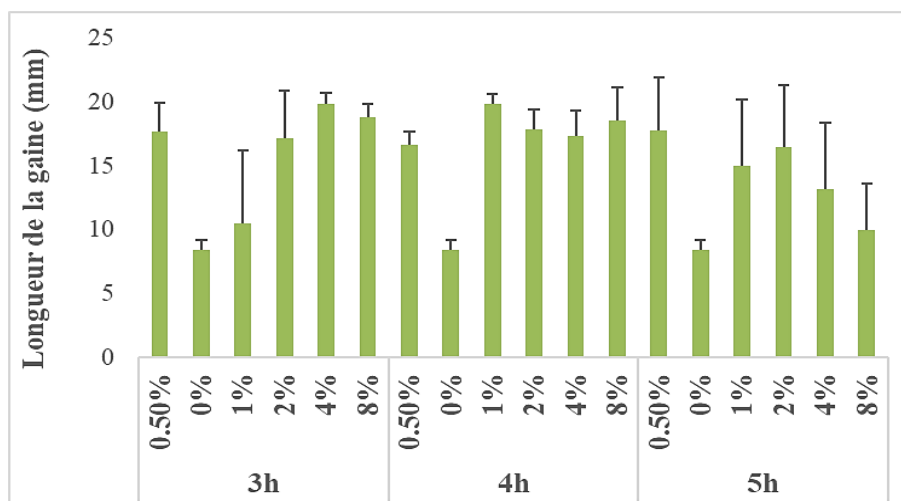


Figure 17 : Variation de la longueur de la gaine des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.5.2. Sable

L’étude de la croissance de la gaine des plantules d’orge sur un substrat sableux amendé au biochar montre que la concentration et la durée de pyrolyse du biochar ont un impact significatif sur le développement végétatif (Fig. 18).

Les meilleurs résultats en termes d’allongement de la gaine ont été obtenus avec des concentrations modérées de biochar (notamment 4 %, 1% et 2%) pyrolysé pendant (3, 4 et 5 heures) , avec des longueurs respectives de (19,367 cm) (19,767 cm) (18,633 cm).

Les concentrations faibles à modérées (1 % 8% 4%) associées à une pyrolyse intermédiaire (3, 4 et 5 heures) respectivement ont permis d’obtenir des longueurs de gaines supérieures à celles du témoin avec (14,567 cm) (14 cm) (11,5 cm) respectivement.

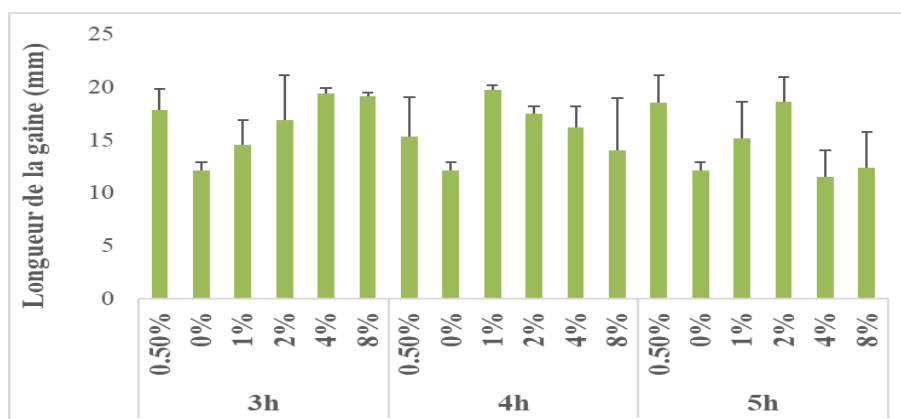


Figure 18 : Variation de la longueur de la gaine des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.6. Longueur de la feuille

1.6.1. Macérat gélosé de biochar

L'évolution de la longueur des feuilles des plantules d'orge cultivées sur un macérat gélosé de biochar mit en évidence l'effet de la concentration appliquée et la durée de pyrolyse (Fig. 19).

Les meilleures longueurs de feuille sont enregistrées chez les plantules poussant sur le macérat de biochar à concentration de 4 % pyrolysé pendant 3 heures d'une moyenne 13,467 mm, suggérant qu'un équilibre entre concentration modérée et pyrolyse contrôlée maximise les effets bénéfiques sur la croissance aérienne. Contrairement on obtient les plus faibles longueurs de feuille chez les plantules poussant sur le macérat à la concentration 8% de biochar pyrolysé pendant 5h d'une moyenne de (4 cm).

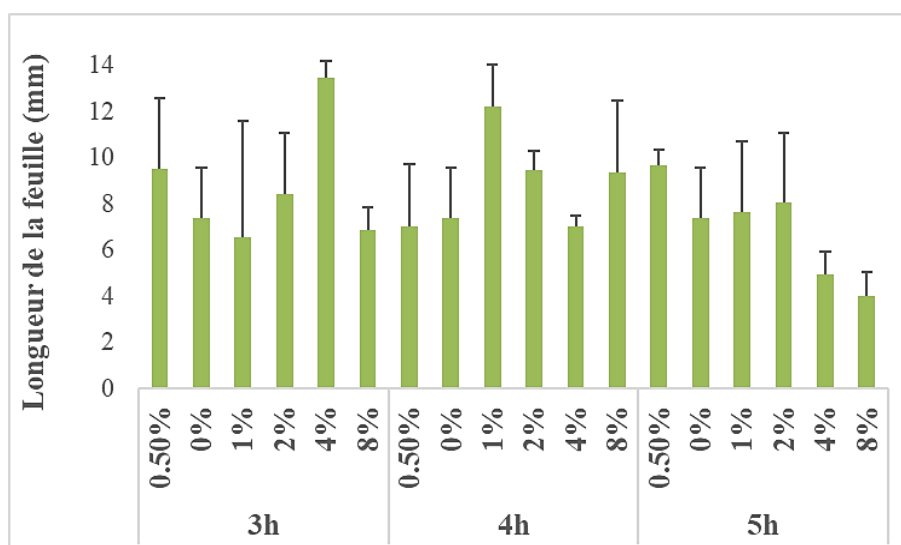


Figure 19 : Variation de la longueur de la feuille des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.6.2. Sable

La figure 20 représente les variations de la longueur des feuilles de l'orge au huitième jour de germination.

Les meilleures longueurs des feuilles est obtenue avec le biochar à 1 % pyrolysé pendant 4 et 5 heures, atteignant une longueur moyenne de 9,333 cm et 9cm. Ce résultat suggère qu'un équilibre optimal entre concentration et pyrolyse modérée favorisant l'allongement des feuilles.

À l’opposé, les concentrations (8 %) des biochar pyrolysé pendant 4h et 3h ont montré une longueur plus faible de 5,9 mm et 4 mm.

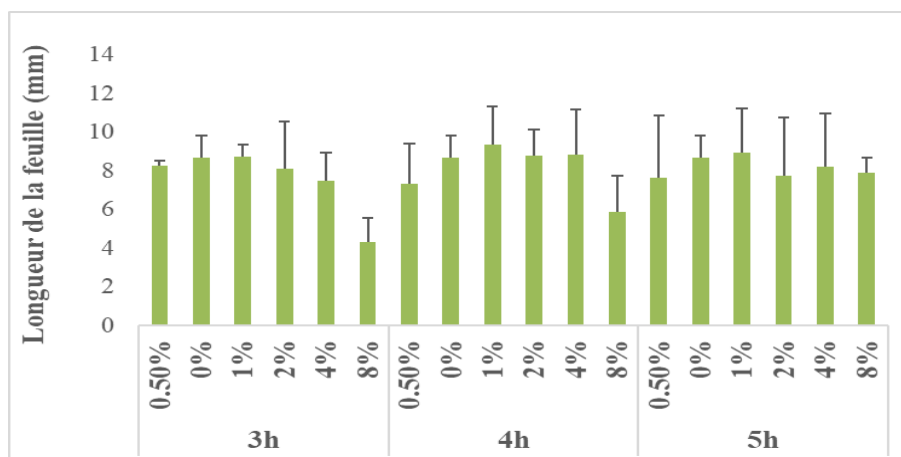


Figure 20 : Variation de la longueur de la feuille des plantules d’orge sur poussant sur le sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.7. Poids moyen frais des plantules

1.7.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure 21 représentent les Variations du poids frais moyen des plantules (g) au huitième jour de germination des graines d’orge sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et des concentrations.

Au huitième jour de germination, les poids frais moyens des plantules varient significativement selon la concentration du biochar et la durée de pyrolyse. Les plantules issues des graines témoins (sans biochar) ont présenté un poids moyen de 0,227 g.

Les résultats indiquent que l’ajout de biochar, dans la majorité des cas, stimule la croissance des plantules. Les poids frais les plus élevés (0,478 g) (0,509 g) ont été observés chez les plantules poussant sur le macérat de biochar pyrolysé à 400 °C pendant 3 et 5 heures à une concentration de 0,5 %, ce qui suggère un effet optimal de cette combinaison sur la biomasse végétale.

À l’inverse, les poids frais les plus faibles ont été enregistrés à une concentration de 1%, 0,5 % et 4% pour des biochars pyrolysés pendant 3, 4 et 5 heures, avec des moyennes respectives de 0,142 g, 0,211 g et 0,119 g montrant que des concentrations élevées peuvent avoir un effet inhibiteur.

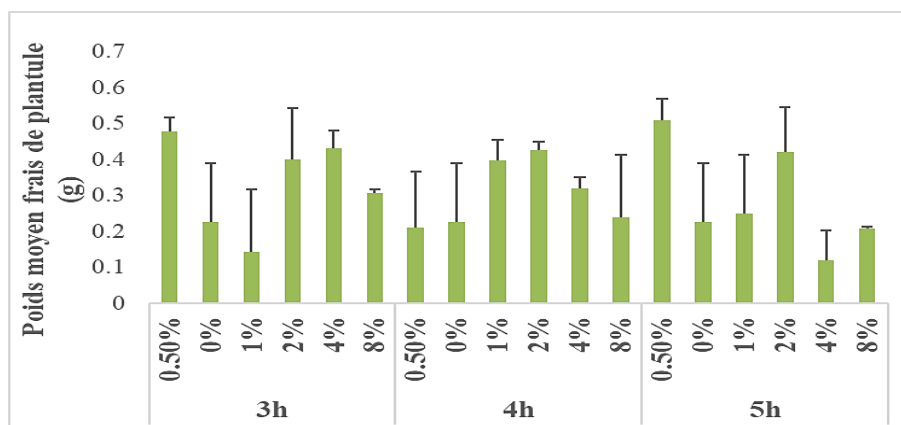


Figure 21 : Variation du poids moyen frais des plantules d’orge poussant sur macérat gélifié de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.7.2. Sable

Les histogrammes de la figure (22) illustrent les poids moyens frais des plantules de l’orge au huitième jour poussant sur le sable et mélangé avec des biochar produits par différentes durées de séjours.

Il est remarquable que les plantules considéré comme témoins aient les poids frais faible par rapport aux autres traitements avec une moyenne de 0,557 g par plantules (Fig. 22).

Les poids frais des plantules les plus élevés ont été enregistrés par une concentration de 0.5% qui sont produits à une température de pyrolyse de 400°C pendant 3h et 5h et avec des moyennes respectives 0,499 g, 0,511 g par plantule. Par contre les poids frais des plantules les plus faibles sont enregistrés par les biochars ayant une concentration de 4% et 1% pyrolysé pendant 3h et 5h avec des moyennes respectives 0,191 et 0,1g.

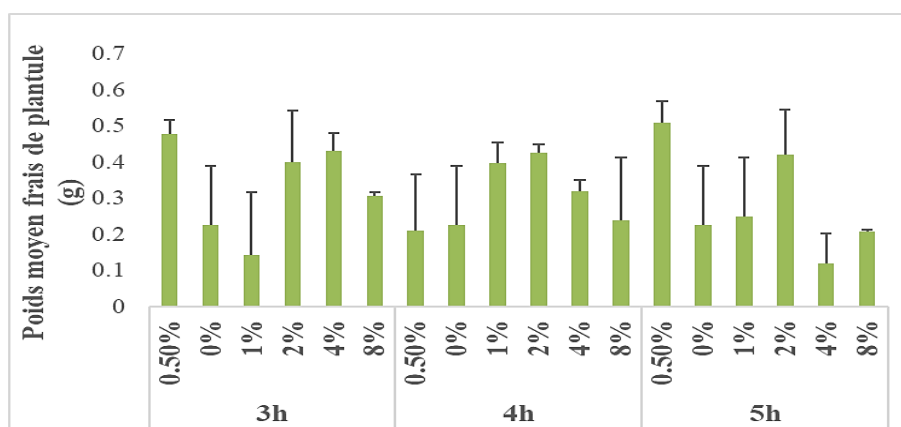


Figure 22 : Variation du poids moyen frais des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.8. Poids moyen sec des plantules

1.8.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (23) illustrent les poids moyens sec des plantules de l'orge poussant sur le macérat et mélangé avec des biochars produits par différentes durées de séjours.

Les plantules témoins, cultivées sans biochar (0 %), ont présenté les poids secs les plus faible avec une moyenne de 0,021 g par plantule.

Parmi les traitements, les poids secs les plus élevés ont été observés chez les plantules poussant sur le macérat gélosé à une concentration de 1 % de biochar pyrolysé à 400 °C pendant 3 heures, avec un poids moyen de 0,027 g, une concentration de 8 % de biochar pyrolysé pendant 4 avec moyenne 0,029 g, et une concentration de 4 % et 8% à 5 heures de pyrolyse avec un poids moyen de 0,028 g.

À l'inverse, les poids secs les plus faibles ont été enregistrés avec une concentration de 0,5 %, 4% et 1% pour des durées de pyrolyse de 3 h, 4 h et 5h, avec des poids moyennes de 0,024 g, 0,022 et 0.023g par plantule respectivement.

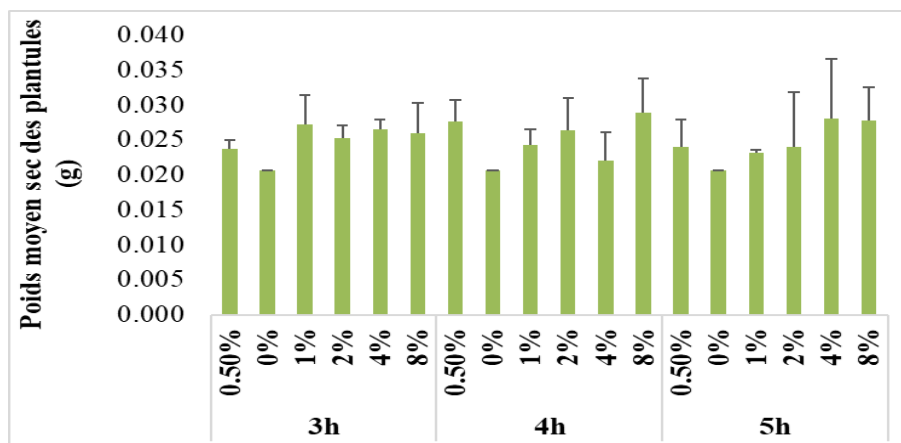


Figure 23 : Variation du poids moyen sec des plantules d'orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.8.2. Sable

Les histogrammes de la figure (24) illustrent les poids moyens sec des plantules de l'orge poussant sur le sable et mélangé avec des biochars produits par différentes durées de séjours.

Ils bien clair d'après les résultats obtenus que les plantules contrôlées ont présenté le poids sec le plus élevé par contre les plantules soumis aux différents traitements de biochar ont enregistré des poids secs plus faibles variant entre 0.035 g et 0.032 g par plantules.

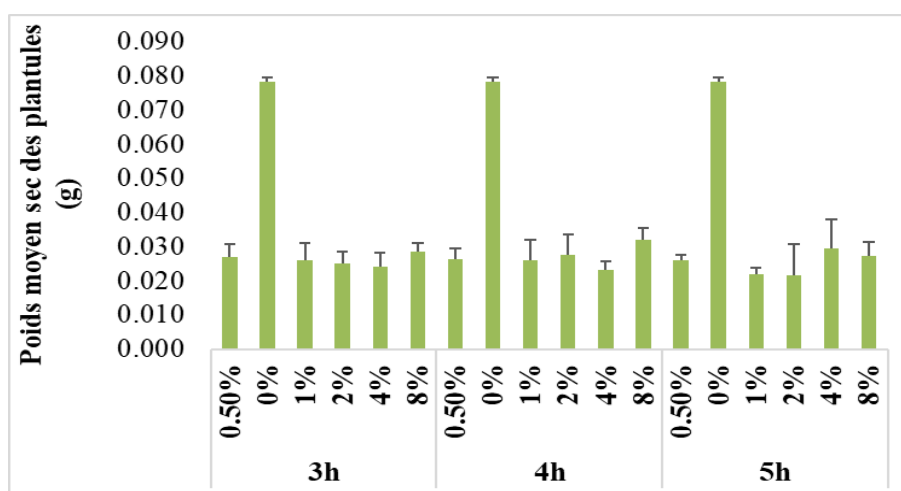


Figure 24 : Variation du poids moyen sec des plantules d'orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

1.9. Teneur en eau des plantules

1.9.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (25) illustrent la teneur en eau des plantules (%), de l'orge poussant sur le macérat gélosé du biochar après 8 jours.

Au huitième jour, la teneur en eau des plantules (%), de l'orge la plus élevée est obtenue pour le traitement de biochar de concentration 0.5% des durées de pyrolyse de 3h et 5h de moyenne de 98%. Tandis que les teneurs de l'eau les plus faibles ont été enregistrées chez les plantules poussant sur le macérat de biochar à concentration 1% et 4% pyrolysé pendant 3h et 5h avec un pourcentage de 51% et 62% respectivement.

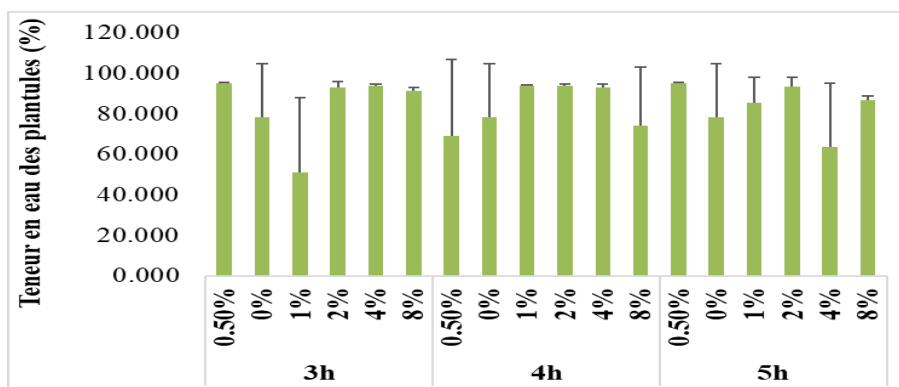


Figure 25 : Variation de la teneur en eau des plantules d’orge poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

1.9.2. Sable

Pour une pyrolyse de 3 heures, les teneurs en eau étaient généralement élevées pour toutes les concentrations, à l’exception de la concentration de 8%, qui a présenté une teneur plus ou moins faible de 78,987 %.

Pour les biochars pyrolysés pendant 4 heures, les concentrations de 1% (95,822 %), 0,5 % (94,453 %), et 4 % (94,173%) ont montré des teneurs en eau les plus élevées. En revanche, la concentration de 8% a affiché une teneur légèrement faible, à 79,115 %, bien que cette valeur reste relativement élevée.

Enfin, pour une pyrolyse de 5 heures, les teneurs en eau les plus élevée ont été enregistré chez les plantules soumis à une concentration de 8 %, atteignant 98,814 %. À l’inverse, la teneur la plus faible a été mesurée à la concentration de 0,5 %, avec une moyenne de 85,664%.

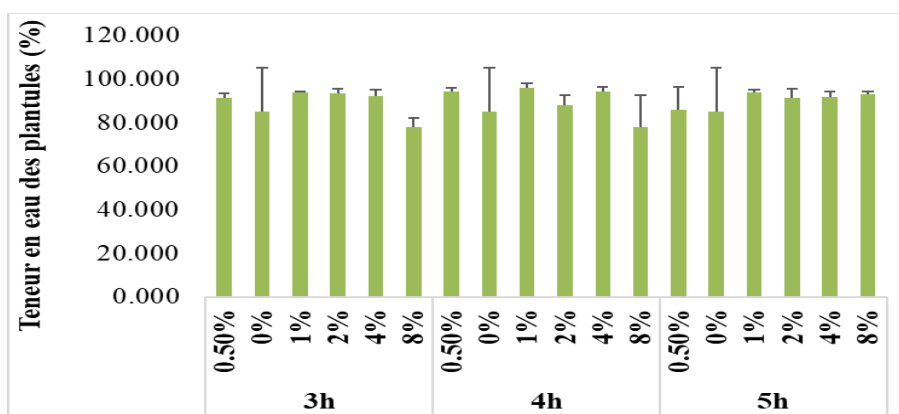


Figure 26: Variation de la teneur en eau des plantules d’orge poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

2. Laitue

2.1. Pourcentage de germination

2.1.1. Macérat gélifié de biochar

Les histogrammes de la figure (36) représentent la variation des pourcentages de la germination de la laitue poussant sur le macérat gélifié du biochar après 3 jours et la figure (37) représente la germination des graines de laitue sur le macérat gélifié de biochar.

Le pourcentage de germination, les graines poussant sur l'eau gélifiée seule (témoin) avaient des pourcentages de germination plus de 15%. Les taux de germination de la laitue les plus élevés ont été enregistré à la durée de pyrolyse 5h à la concentration 4%. Tandis que les autres concentrations à des valeurs plus moins 1% et 2% du macérat de biochar pendant 3h avec des moyennes respectives de 42,85%, 20,63%. Les pourcentages de germination les plus faibles ont été obtenus chez les graines soumises à la concentration de 8% pendant 4h avec une moyenne respective de 6,34%.

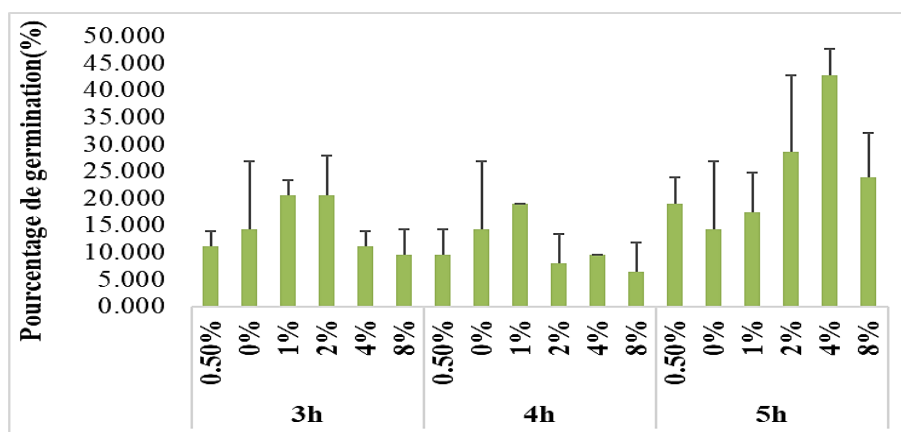


Figure 6 : Variation de pourcentage de germination des graines de la laitue sur macérat gélifié de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.



Figure 7: Germination de la laitue sur macérat gélosé.

2.1.2. Sable

Les histogrammes présentés dans la figure (39) montrent la variation des pourcentages de germination de la laitue semis sur le sable de biochar après une période de 3 jours. Et la figure (40) représente la germination des graines de laitue sur le sable enrichi de biochar.

Le pourcentage de germination des graines dans le témoin a supérieure de 40%. Les taux de germination les plus élevés pour la laitue ont été obtenus à durant 5 heures de pyrolyse. Les pourcentages de germination les plus significatifs ont été enregistrés pour les graines exposées à une concentration de 2% pendant 5 heures, ainsi que pour les concentrations de 4% et 2% du macérat de biochar pendant 3,4 heures, avec des moyennes respectives de 16,66% et 33,33%. En revanche, les pourcentages de germination les plus faibles ont été notés pour les graines soumises à une concentration de 0,5% pendant 3 heures, avec une moyenne de 2,22% et absence totale de germination da la concertation 8%.

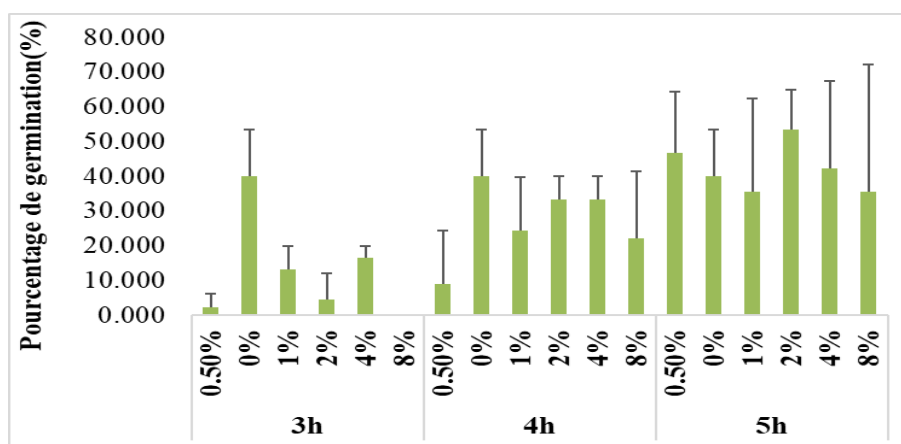


Figure 8: Variation de pourcentage de germination des graines de la laitue semis sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.



Figure 9: Germination de la laitue sur sable.

2.2. Longueur des racines

2.2.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (42) représentent la longueur des racines de la laitue poussant sur le macérat gélosé du biochar au 3ème et au 8ème jours de germination.

Dans cette graphique tous les résultats enregistrés des longueurs des racines faible dans toutes les durées par rapport ou les graines témoins présentaient les racines à une moyenne de 0,63 mm.

La durée 3 heures est une concentration de 0.5 %, ont favorisé le développement des racines les plus longues. Le contraire a marqué les concentration 2% et 4% une longueur des racines moindre avec des moyenne respectives 0,133 cm.

Les longueurs de racines les plus significatives ont été observées chez les graines cultivées avec une concentration de 1 % et 8% de pendant 4 heures 0,267 cm, 0,167 cm et une longueur obtenue dans la concentration 0,5% à une moyenne de 0,067 cm.

Ainsi qu'avec une concentration de 4% pendant 5 heures, affichant une moyenne de 1 cm. Les longueurs de racines les plus faibles ont été mesurées chez les graines à concentration 0,5 % et 0% à moyenne de 0,667 cm.

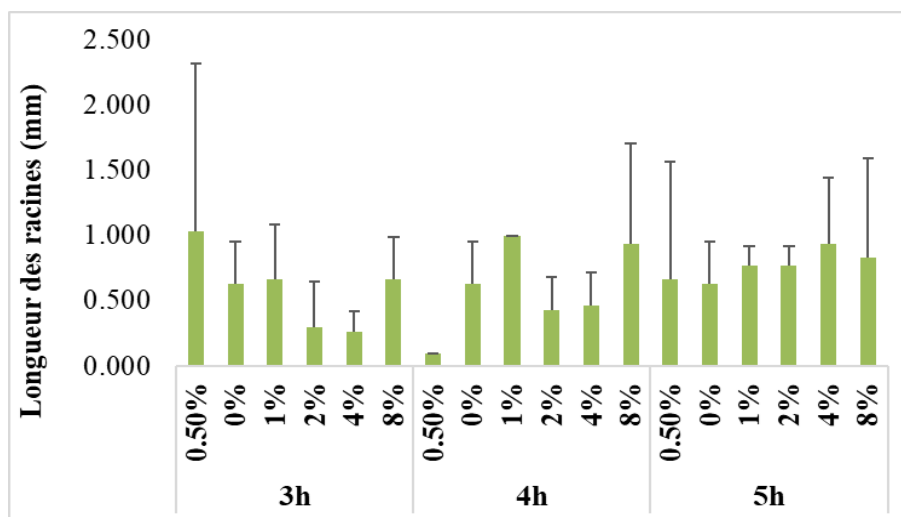


Figure 10: Variation de longueur des racines de plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

2.2.2. Sable

Les histogrammes de la figure (44) illustrent la longueur des racines de la laitue poussant sur le sable gélosé du biochar au 3ème et au 8ème jours de germination.

Au huitième jour de germination, la laitue considérées comme témoins ont développé des racines d'une longueur moyenne de 0,7 cm. La durée 3h à concentration 2% ont permis d'obtenir les racines les plus longues 0,9 cm et dans concentration 4% qui semblent affecter négativement la longueur des racines.

Les longueurs de racines les plus significatives ont été observées chez les plantules issues de graines traitées avec du biochar à une concentration de 0.5 %, pyrolysé pendant 4 heures, avec des longueurs moyennes respectives de 1,10 cm. Un allongement racinaire modéré a également été enregistré à la concentration de 1 %, 4% avec une moyenne de 0,3 cm.

De plus, une concentration de 1% appliquée à un biochar pyrolysé pendant 5 heures a conduit à une croissance racinaire notable, avec une longueur moyenne atteignant 1 cm.

À l'inverse, les longueurs racinaires les plus faibles ont été mesurées chez les plantules issues des traitements à 2 % de biochar, avec des moyennes respectives de 0,2 cm, indiquant une réponse moins favorable dans ces conditions.

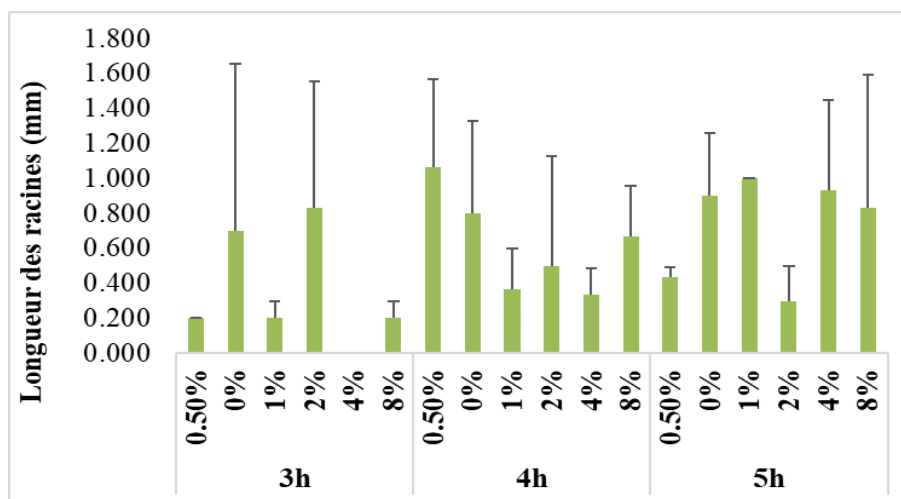


Figure 11: Variation de la longueur des racines des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

2.3. Longueur de la partie aérienne

2.3.1. Macérat gélifié de biochar

Les histogrammes de la figure 46 présentent la hauteur moyenne de la partie aérienne (en mm) des plantules de laitue cultivées sur macérat gélifié de biochar, après 8 jours de germination.

Les graines témoins, cultivées sans biochar, ont affiché la plus élevée hauteur, avec une moyenne de 2,9 cm. L'application de biochar pyrolysé pendant 3 heures à une concentration de 0% et 4% a favorisé une croissance optimale de la partie aérienne. En revanche, le même taux de concentration appliqué à un biochar pyrolysé pendant 4 heures à concentration 0 % et 1%, avec une hauteur de 2,5 cm.

La plus grande hauteur a été enregistrée chez les plantules traitées avec du biochar pyrolysé pendant 5 heures à une concentration de 0,5 % et 4%, atteignant une moyenne de 2,4 mm et 2,3 cm. À l'opposé, une concentration de 8 % a eu un effet inhibiteur net, avec une réduction significative de la hauteur à 0,5 cm.

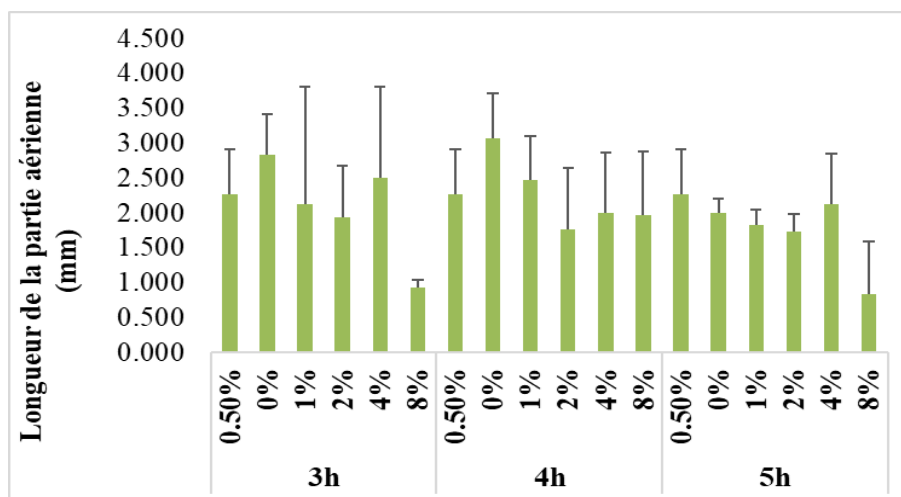


Figure 12: Variation de la longueur de la partie aérienne des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

2.3.2. Sable

Les histogrammes de la figure (48) représentent la hauteur moyenne (en mm) de la partie aérienne des plantules de laitue cultivées sur sable de biochar, après 8 jours de germination.

Les graines témoins, cultivées sans biochar, ont présenté la faible hauteur, avec une moyenne de 1,2 cm. L'application de biochar pyrolysé pendant 3 heures, aux concentrations de 0,5% et 4 %, a également favorisé une croissance relativement optimale de la partie aérienne à des moyennes 1,9 cm, 1,933 cm et noté aucune longueur dans la concentration 8%.

En revanche, à 4 heures de pyrolyse, les concentrations de 2% et 1 % ont donné des résultats légèrement supérieurs, avec des hauteurs moyennes avoisinant 2,9 mm et 2,467 cm.

La plus grande hauteur parmi les traitements au biochar a été obtenue avec le biochar pyrolysé pendant 5 heures, à des concentrations de 0,5 % et 4 %, atteignant respectivement 2,4 mm et 2,3 cm.

À l'opposé, la concentration de 1% ,2% et 8 % a montré un effet inhibiteur marqué, avec une réduction significative de la hauteur de la partie aérienne, qui chute à 3,167 cm ,3,333 cm et 2,967 cm.

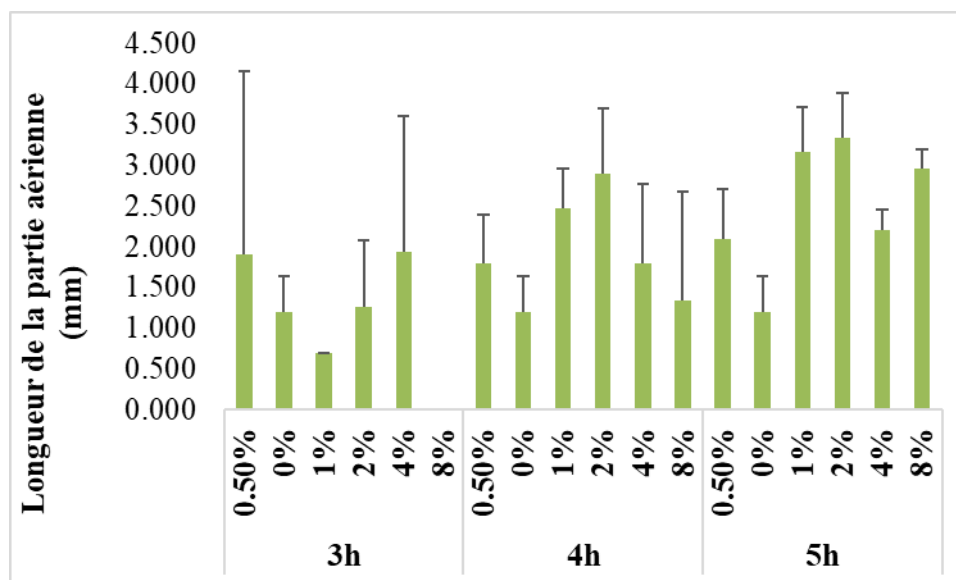


Figure 13 : Variation de la longueur de la partie aérienne des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

2.4. Poids moyen frais des plantules

2.4.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (49) représentent les poids moyens frais des plantules de la laitue poussant sur les macérats gélosés des biochars.

Il est évident que les plantules considérées comme témoins ont les poids frais les plus faibles 0.5% et 2% pendant 4 h, 5h et 3h avec des moyennes respectives de 0,008, 0,012 et 0,017 g par plantules. Tous les biochars ont permis d'obtenir des plantules avec des poids frais faible. Tandis que le plus élevée 8% à la durée 4h avec moyennes respectives 0.061 g.

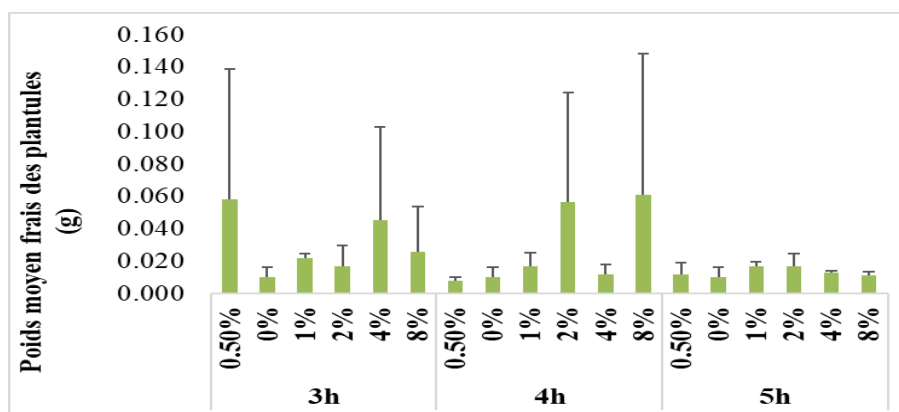


Figure 14: Variation du poids moyen frais des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

2.4.2. Sable

Les histogrammes présentés dans la figure (50) montrent les poids frais moyens des plantules de laitue cultivées sur le sable gélosés de biochars.

Il est clair que les plantules du groupe témoin affichent les poids frais les plus bas, avec des valeurs négative à concentration 8 % après 3 h.

En revanche, à 4 heures de pyrolyse, les concentrations de 2 % et 4 % ont donné des résultats légèrement supérieurs, avec de poids moyennes avoisinant 0,026 g et 0,024 g.

Le plus grand poids parmi les traitements au biochar a été obtenue avec le biochar pyrolysé pendant 5 heures, à des concentrations de 2 % et 1%, atteignant respectivement 0,033 g et 0,032 g. À l'opposé, la concentration de 0 % et 0,5 % a montré des moyennes qui chute à 0,011 g et 0,023 g.

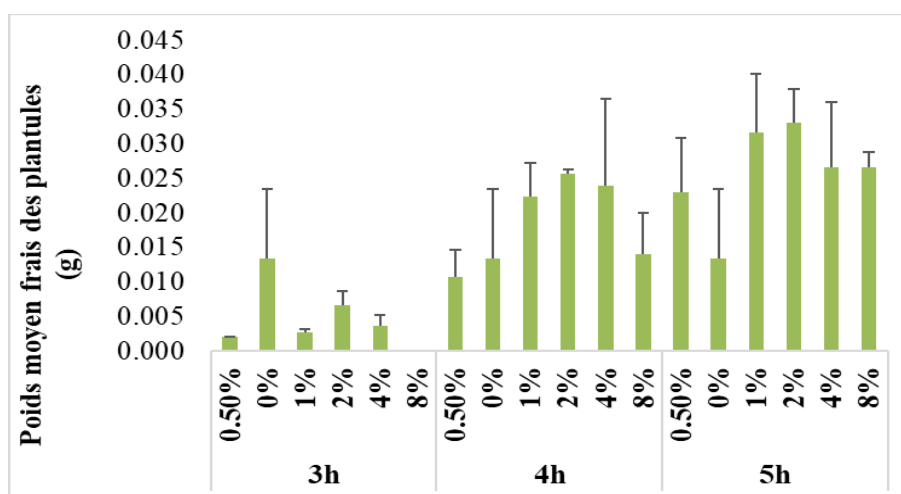


Figure 15 : Variation du poids moyen frais des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

2.5. Poids moyen sec des plantules

2.5.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes présentés dans la figure (51) montrent les poids sec moyens des plantules de laitue cultivées sur le macérat gélosés de biochars.

À partir de ces graphique les poids secs des plantules les plus élevés sont enregistrés par les biochars ayant des concentrations de 1%, pendant 5h avec de moyenne 0,00267g par plantule. Tandis que tous les résultats de poids secs des plantules sont enregistrés des valeurs moindres.

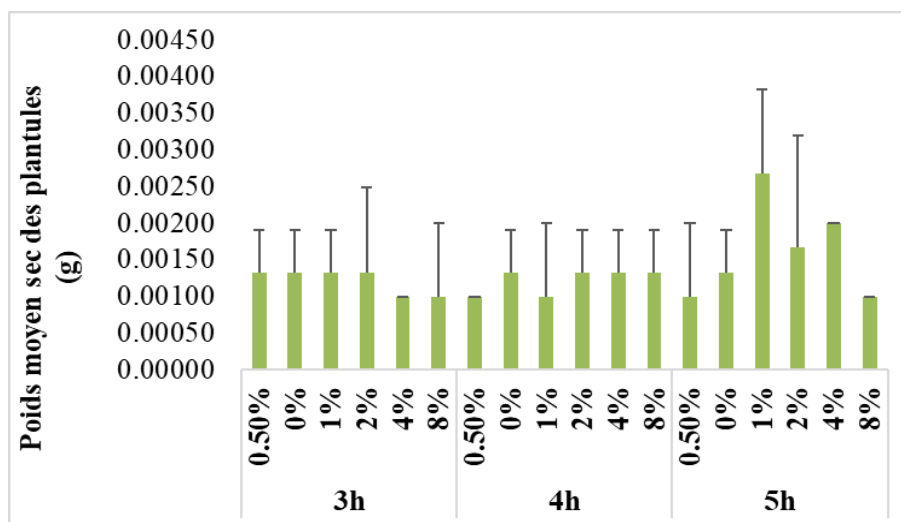


Figure 16: Variation du poids moyen sec des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

2.5.2. Sable

Les histogrammes présentés dans la figure (52) montrent les poids sec moyens des plantules de laitue cultivées sur le sable enrichi de biochars.

Dans la durée de pyrolyse 3h on a obtenue des valeurs presque négatives dans toutes les concentrations par rapport au témoin avec une valeur de 0,0063 g.

Les poids secs des plantules les plus élevés sont enregistrés par les biochars ayant des concentrations de 2% et 4%, pendant 4h à des moyennes 0,1200 g et 0,1067 g. À l'opposé, la concentration de 0.5% a montré une valeur inférieure de 0,0433 g.

À la durée de pyrolyse 5h le poids sec le plus élevé enregistré dans les concentrations 1% et 2% à des moyennes 0,1467 g et 0,1000 g. À l'inverse la valeur la plus faible obtenue chez les concentrations 0% et 0.5 % à de valeur 0,0967 g.

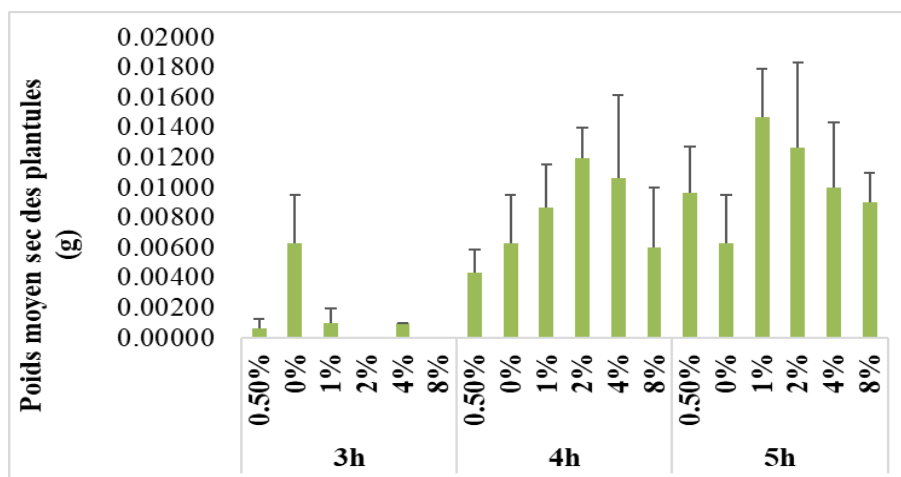


Figure 17 : Variation du poids moyen sec des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

2.6. Teneur en eau des plantules

2.6.1. Macérat gélosé de biochar

Les histogrammes de la figure (53) illustrent la teneur en eau des plantules (%), de la laitue poussant dans le macérat gélosé du biochar après 8 jours.

La teneur en eau des plantules (%), des graines de la laitue le plus élevé a été obtenus par le macérat de biochar produits à 400°C pendant toutes les durées de pyrolyse. Ces traitements ont permis d'obtenir des taux supérieurs à ceux des témoins. la teneur en eau des plantules les plus élevés ont été obtenus chez les graines soumises à la concentration de 0.5%, 2% du macérat de biochar produit à 400°C pendant la durée de pyrolyse de biochar 3h (95,73%), 4h (94,03) et 5h (91,27%), la concentration de 4% du macérat de biochar produit à 400°C pendant 5 h et faible avec de moyenne respectives 85,21%.

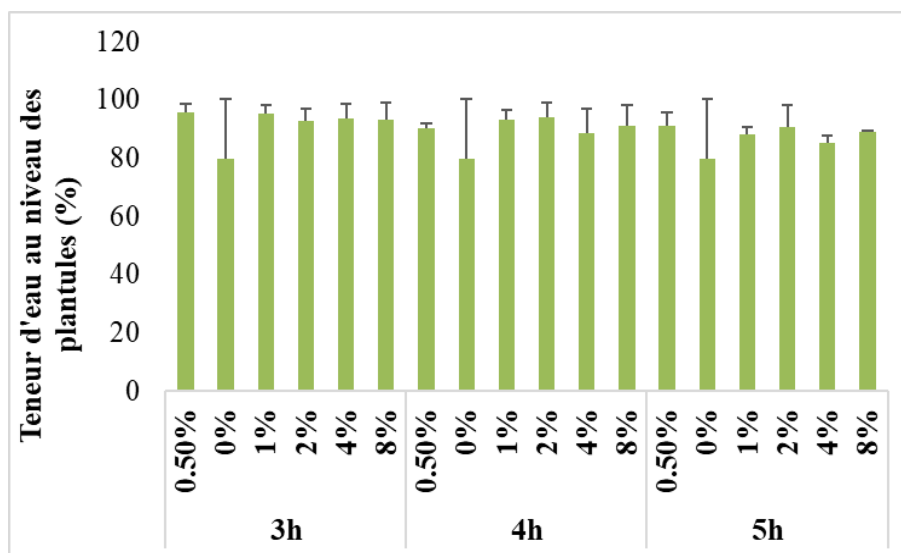


Figure 18 : Variation de la teneur d'eau au niveau des plantules de la laitue poussant sur macérat gélosé de biochar, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations.

2.6.2. Sable

Les histogrammes de la figure (54) illustrent la teneur en eau des plantules (%), de la laitue poussant sur le sable enrichi du biochar après 8 jours.

La teneur en eau des plantules (%), des graines de la laitue le plus élevé a été obtenus par le biochar produits à 400°C pendant 3 h de pyrolyse dans la concentration 2% à moyenne de 94.263 %. À l'inverse, le résultat obtenu a été affecté négativement à la concentration 8%.

Ces traitements ont permis d'obtenir des taux supérieurs à ceux des témoins. La teneur en eau des plantules dans la durée de pyrolyse 4h la teneur la plus élevés ont été obtenus chez les graines soumises à la concentration de 0.5%, 8% du macérat de biochar produit à 400°C à des valeurs (50,334%), (61,223 %).

À la durée de pyrolyse 5h le poids sec le plus élevée enregistré dans les concentrations 4% et 8% à des moyennes 63,216 % et 63,068 %. À l'inverse la valeur le plus faible obtenue chez les concentrations 0% et 1 % à de valeur 62,286 %.

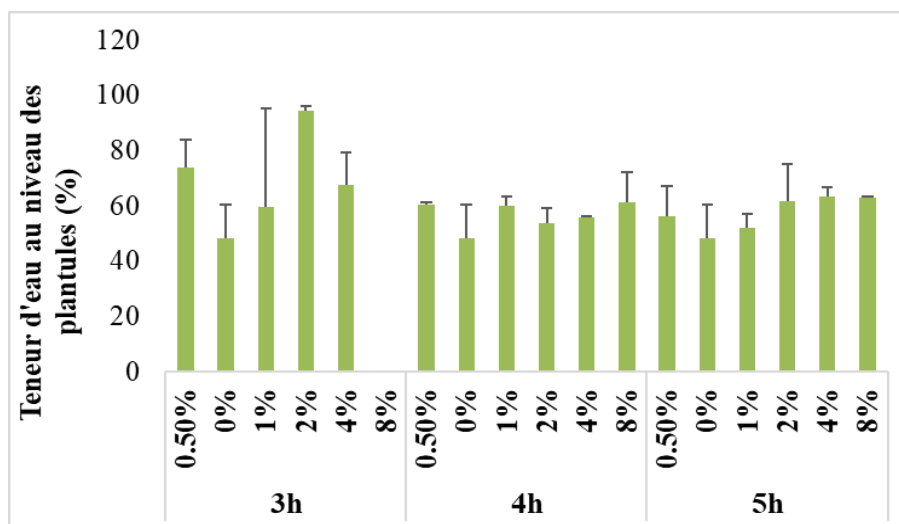


Figure 19: Variation de la teneur d'eau au niveau des plantules de la laitue poussant sur sable, en fonction des durées de pyrolyse et concentrations de biochar.

Discussion

Le biochar présente des performances intéressantes et repose sur divers mécanismes qui contribuent à l'amélioration de la fertilité des sols. Il peut agir comme source de nutriments, améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol, favoriser le stockage des éléments nutritifs, et fonctionner comme un engrais à libération lente, tout en stimulant les activités biologiques du sol (Ding *et al.*, 2016).

Dans le cadre de cette étude, l'objectif était d'évaluer le potentiel toxique du biochar, en particulier celui issu des branches d'olive, en fonction des conditions de pyrolyse appliquées : une température (400 C°) et trois durées (3 h, 4 h et 5 h). L'effet de ces différents biochars a été examiné à travers des tests de germination réalisés sur des graines d'orge et la laitue.

Les essais ont été menés en utilisant deux types de substrats liquide et solide : du macérat de biochar et du sable enrichi au biochar, et selon différentes concentrations de biochar incorporé : 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 % et 8 %.

D'après notre propre expérimentation, les test de germination sur les graines d'orge et la laitue, les deux substrats testés ont montré.

L'orge :

Dans le milieu macérat gélosé, on a observé la germination des graines d'un moyenne 50 % dans le premier jour, une poursuite normale de la germination par la suite toutes les graines germées à 100% en troisième jours. Par contre dans le milieu sable gélosé la germination est retardée au cours de premiers et deuxièmes jours mais c'est rétabli aux troisièmes jours.

Nos résultats montrent clairement que le biochar améliore les paramètres de croissance de l'orge dans macérat gélosé, contrairement dans le sable gélosé on notable retarde de germination dans le premier et deuxième jour à raison de deux possibilités soit la température de l'incubation ou bien des facteurs abiotique.

Pour les autres paramètres de croissance étudiées, l'application de biochar ce soit en milieu gélosé ou en sable augmentait de manière significative divers paramètres de croissance des plantes telle que les caractéristiques morphologiques des racines et la longueur de la gaine par rapport au groupe témoin. (Jaborova *et al.*, 2021).

Les résultats obtenus lors des deux tests de phytotoxicité ont montré que le biochar issu de branche d'olive n'exerçait aucun effet inhibiteur sur la germination des graines, quelle que soit la concentration appliquée ou le substrat utilisé (Carril *et al.*, 2023). Cette absence d'effet négatif constitue une première indication de l'innocuité du biochar, suggérant qu'il peut être utilisé sans risque phytotoxique dans un cadre agricole (Baldovi *et al.*, 2023). Ce constat rejoint plusieurs études antérieures ayant rapporté la tolérance de certaines cultures à l'application de biochar à faibles doses (Hoover, 2018 ; Saletnik *et al.*, 2019).

Concernant la longueur des racines, l'orge semble moins sensible aux effets potentiellement inhibiteurs du biochar comparé à d'autres espèces comme la laitue. Globalement, le biochar favorise une meilleure croissance racinaire, probablement en améliorant la structure physique du substrat, ce qui facilite l'aération et la rétention d'eau, essentiels au développement racinaire. De plus, le biochar pourrait stimuler l'activité des micro-organismes bénéfiques du sol, ce qui contribue à une meilleure disponibilité des nutriments pour la plante (Beesley *et al.*, 2011).

Pour la longueur des feuilles, l'impact du biochar est généralement faible, avec parfois une légère stimulation de la croissance foliaire. Cette stimulation est vraisemblablement liée à l'amélioration de la capacité du substrat à retenir l'eau et les nutriments, ainsi qu'à une meilleure porosité qui favorise l'absorption racinaire. Ces conditions permettent une meilleure nutrition hydrique et minérale, essentielle à l'allongement des feuilles (Egamberdieva *et al.*, 2016).

En ce qui concerne la longueur de la gaine, les résultats sont plus contrastés. Un effet positif a été observé dans certains cas, ce qui indique que le biochar n'entrave pas le développement de cette partie aérienne (Bamminger *et al.*, 2014). Cependant, une réduction modérée de la longueur de la gaine a été notée dans certains contextes, possiblement en raison d'une fixation accrue des micronutriments essentiels par le biochar, ce qui limite leur disponibilité pour la plante. De plus, une modification du pH du substrat induite par le biochar pourrait affecter la solubilité et l'absorption des éléments traces nécessaires à la croissance des tissus (Schulz *et al.*, 2013).

Par ailleurs, l'amélioration du poids frais et sec des plantules d'orge observée dans nos essais laisse penser que le biochar pourrait également jouer un rôle dans la stimulation de la croissance. Ce phénomène pourrait être attribué à la réduction de la toxicité du substrat via la

pyrolyse, ainsi qu'à l'amélioration de la rétention en nutriments et en eau, deux facteurs essentiels à la germination et au développement initial des plantules (Naeem *et al.*, 2017).

La laitue

Il a été remarqué, pour la germination sur le macérat gélosé de biochar que l'apport de biochar dans les milieux de culture à stimuler la germination de la laitue par rapport aux témoins au cours des 3 premiers jours. Au-delà de là, les résultats des pourcentages de germination étaient comparables à ceux des témoins. Pour la germination de la laitue sur le sable, ce dernier a retardé la germination de laitue. Cependant, l'apport de biochar a permis d'obtenir des pourcentages de germination moyenne. Le taux de germination faible dans les deux substrats comparés à ceux obtenus pour l'orge peut être expliqué soit par la qualité des graines, ou bien l'effet négative de biochar.

Ces résultats sont cohérents avec ceux de (Méndez *et al.*, 2012) qui ont montré que des biochars mal stabilisés (temps courte ou température basse), peuvent contenir des composés volatiles phytotoxiques. Beesley *et al.* (2011) confirment également qu'un biochar mature (temps plus long) favorise la germination.

Le biochar tend à modifier la longueur des racines selon sa composition chimique et sa stabilité. En général, les racines développent une meilleure croissance dans un environnement où les substances toxiques sont minimisées et où la structure du substrat est améliorée. Sur gélose et sable, la présence directe et prolongée du biochar en contact avec les racines peut exacerber les effets toxiques résiduels, limitant ainsi la croissance racinaire si le biochar contient des composés organiques non dégradés. (Lehmann *et al.*, 2014).

L'étude de Rees *et al.* (2014) indiquent que des biochars pyrolysés trop brièvement altèrent le développement racinaire en raison de la présence d'acides organiques. De même Jeffrey *et al.* (2015) suggèrent qu'une pyrolyse prolongée augmente la porosité du biochar, favorisant l'aération du sol et donc l'expansion racinaire.

La hauteur des parties aériennes est également affectée par le biochar. Sur gélose, les effets inhibiteurs sont plus facilement observables en raison du contact étroit et prolongé entre le biochar et le système racinaire, pouvant engendrer un stress hydrique ou nutritionnel. Sur sable, la croissance aérienne est généralement moins perturbée, grâce à une meilleure

disponibilité de l'eau et des nutriments, ainsi qu'à une réduction des stress racinaires. (Bamminger *et al.*, 2014).

Toutefois, il est possible que le biochar influence la disponibilité des micronutriments essentiels, notamment le fer, le zinc et le manganèse, soit en les fixant, soit en modifiant le pH du substrat, ce qui peut réduire leur absorption et limiter la croissance des parties aériennes, même si la croissance racinaire paraît normale (Mohamed *et al.*, 2021).

D'autre part, Novak *et al.* (2012) précisent que l'effet dépende du type de biochar, certaine à forte alcalinité (ce qui peut arriver à 5h) peut limiter l'absorption d'eau par les racines.

L'évaluation de la phytotoxicité du biochar sur la laitue, plante souvent utilisée comme modèle en tests de germination, a révélé des résultats contrastés dans la littérature. En effet, bien que certains travaux rapportent que le biochar peut libérer des composés phytotoxiques susceptibles de retarder la germination ou d'altérer la croissance des plantules, le biochar favorise la vie microbienne bénéfique, comme les bactéries fixatrices d'azote et améliore le taux et la vitesse de germination des de la laitue il crée un environnement plus favorable à l'humidité et l'oxygénation des semences (Méndez *et al.*, 2012).

Dans notre expérience mettent en évidence un effet négative à concentrations (0,5 % à 2 % et 8%) dans la durée de pyrolyse 4h.

Cependant, il convient de rester vigilant quant à la nature du biochar utilisé, la température et la durée de pyrolyse, ainsi que les concentrations appliquées, car des paramètres inadaptés peuvent inverser ces bénéfices. De plus, la sensibilité spécifique de la laitue en fait un excellent bioindicateur, mais il serait pertinent de compléter ces résultats par des études sur d'autres cultures pour une meilleure généralisation (Alqahtani *et al.*, 2019).

D'autres études, comme celle de Hoover (2018), ont mis en évidence une phytotoxicité potentielle du biochar, en particulier lorsque celui-ci est appliqué à des concentrations élevées ou lorsqu'il est issu de pyrolyses à températures trop élevées, pouvant générer des composés inhibiteurs tels que les phénols ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). Ces différences pourraient s'expliquer par la variabilité des matières premières utilisées, des conditions de pyrolyse (température, durée), ainsi que par la sensibilité de la laitue à certains constituants chimiques du biochar.

De manière générale, l'application du biochar a entraîné une augmentation significative du poids frais et du poids sec des plants d'orge et la laitue, comparativement au témoin. Cette amélioration peut être liée à la réduction des substances toxiques dans le sol, permise par la pyrolyse lors de la production du biochar. Ces observations sont en accord avec les travaux de Naeem *et al.* (2017), qui ont mis en évidence une amélioration de la croissance végétale suite à l'utilisation de biochar comme amendement.

Ces résultats suggèrent que le biochar de branche d'olive, produit dans des conditions contrôlées, représente une option prometteuse comme amendement organique, à condition de poursuivre les recherches sur ces effets à long terme sur différents types de sols et des cultures.

CONCLUSION

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'effet phytotoxique potentiel du biochar produit à partir de branche d'olive sur deux espèces végétales contrastées : l'orge (*Hordeum vulgare*), plante rustique souvent utilisée dans les études de bioamendements, et la laitue (*Lactuca sativa*), espèce modèle fréquemment mobilisée dans les tests de phytotoxicité en raison de sa sensibilité aux composés inhibiteurs. Le biochar a été appliqué sous forme de macérat ou de substrat mélangé à du sable, à différentes concentrations (0 %, 0,5 %, 1 %, 2 %, 4 % et 8 %), et produit à différentes températures de pyrolyse (400 °C) et durées (3h, 4h, 5h).

Le biochar représente une alternative durable et prometteuse dans le cadre de l'agriculture écologique, à condition de maîtriser ses caractéristiques techniques et son mode d'utilisation.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette étude met en évidence que le biochar, lorsqu'il est produit à partir de matières organiques comme le branche d'olive et appliqué à des concentrations modérées, ne présente pas d'effet phytotoxique significatif. Que ce soit sur des espèces résistantes comme l'orge ou sensibles comme la laitue, une amélioration des paramètres de croissance a souvent été notée, notamment en termes de poids frais et sec des plantules.

Ces observations suggèrent que, dans des conditions de production et d'application bien contrôlées, le biochar constitue un amendement organique sûr et bénéfique, capable de soutenir la croissance des cultures tout en améliorant la qualité du sol. Toutefois, la variabilité des effets selon la matière première, les conditions de pyrolyse et les doses utilisées souligne la nécessité d'évaluer chaque biochar individuellement avant son usage agricole à grande échelle.

Cette recherche met en évidence l'importance de poursuivre les investigations sur l'utilisation de substances naturelles telles que le biochar dans la lutte biologique. Cette approche offre une alternative écologique et durable aux méthodes chimiques traditionnelles, en limitant les impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, l'emploi des branches d'olive comme biochar contribue à promouvoir des pratiques agricoles respectueuses des écosystèmes, tout en préservant la fertilité des sols et la productivité des cultures. Ainsi, l'intégration du biochar dans les systèmes agricoles représente une voie prometteuse vers une agriculture plus résiliente, durable et écoresponsable.

Références bibliographiques

- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2014). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536–544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>
- Allaire, S. E., & Lange, S. F. (2013). Effets du biochar sur les propriétés du sol et la productivité des cultures : revue de littérature. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 13(3). <https://doi.org/10.4000/vertigo.14639>
- Alqahtani, A., Alkayali, A., Rasheed, R., et al. (2019). *Pyrolytic and hydrothermal carbonization of date palm leaflets: Characteristics and ecotoxicological effects on seed germination of lettuce*. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 54(5), 345–356
- Baldovi, G. et al. (2023). *Biochars derived from olive mill byproducts: typology, characterization, and eco-efficient application in agriculture: a systematic review*. *Sustainability*, 16(12), 5004.
- Bamminger, C., Marschner, B., & Jäger, N. (2014). *Use of biochar and hydrochar to improve physical and chemical properties of soil and substrate*. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, 177(5), 714–723.
- Bamminger, C., Marschner, B., & Jäger, N. (2014). Use of biochar and hydrochar to improve physical and chemical properties of soil and substrate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 714–723. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300282>
- Bamminger, C., Marschner, B., & Jäger, N. (2014).** Use of biochar and hydrochar to improve physical and chemical properties of soil and substrate. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 714–723. <https://doi.org/10.1002/jpln.201300282>
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2011). *Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil*. **Environmental Pollution**, 158, 2282–2287.
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and

- restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269–3282.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>
- Carril, P., Ghorbani, M., Loppi, S. & Celletti, S. (2023). *Effect of biochar type, concentration and washing conditions on the germination parameters of three model crops*. **Plants**, 12(12), 2235.
- Ding, Y., Liu, Y., Wu, W., Shi, X., Yang, M., Zheng, L., & Zhou, D. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 14(4), 423–444.
<https://doi.org/10.1007/s10311-016-0564-6>
- Egamberdieva, D., Jabborova, D., & Wirth, S. (2016). *Alleviation of salt stress in lettuce (Lactuca sativa L.) by arbuscular mycorrhizal fungi and biochar*. **Applied Soil Ecology**, 105, 170–177.
- García-Rubio, I., Parra, J., Sánchez-Monedero, M. A., et al. (2020). Fuel characteristics and phytotoxicity assay of biochar derived from rose pruning waste. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27654–27668. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08896-w>
- Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2001). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal – a review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219–230. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4>
- Hoover, C. M. (2018). Effects of biochar on seed germination and early plant growth: A review. *Journal of Environmental Quality*, 47(3), 665–674.
<https://doi.org/10.2134/jeq2017.11.0450>
- Hoover, C. M. (2018). Effects of biochar on seed germination and early plant growth: A review. *Journal of Environmental Quality*, 47(3), 665–674.
<https://doi.org/10.2134/jeq2017.11.0450>
- Jabborova, D., Rakhmatov, K., & Kim, H. (2021). Beneficial effects of biochar application on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, root morphological traits and physiological properties. *Annals of Phytomedicine*, 10(1), 271–277.
<https://doi.org/10.54085/ap.c/2021/10.1.33>
- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K. A., & Verheijen, F. G. A. (2017). Biochar effects on crop yield. In Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed., pp. 301–326). Routledge.

- Jeffery, S., Abalos, D., Spokas, K. A., & Verheijen, F. G. A. (2017). Biochar effects on crop yield. In Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management* (pp. 301–326). Routledge.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.
- Lehmann, J., da Silva Jr., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2011). Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: Fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249, 343–357.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
- Lehmann, J., Kern, D. C., German, L. A., McCann, J., Martins, G. C., & Moreira, A. (2003). Soil fertility and production potential. In: *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Springer, Dordrecht. pp. 105–124. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1336-1_6
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2009). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Méndez, A., Gómez, A., Paz-Ferreiro, J., & Gascó, G. (2012). Effects of sewage sludge biochar on plant metal availability after application to a Mediterranean soil. *Chemosphere*, 89(11), 1354–1359. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.05.092>

- Mohamed, I. A. A., et al. (2021). *Biochar application alters heavy metal availability and microbial community structure in contaminated soil: A review*. Journal of Environmental Management, 280, 111828. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111828>
- Naeem, M. A., Khalid, M., Aon, M., Abbas, A., Tahir, M. I., & Murtaza, G. (2017). Comparative efficacy of different biochars in improving growth and nutrient uptake of maize (*Zea mays* L.) under salinity stress. Journal of Plant Nutrition, 40(14), 2006–2017. <https://doi.org/10.1080/01904167.2016.1240193>
- Peake, L. R., Reid, B. J., & Tang, X. (2014). Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. Geoderma, 235–236, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.002>
- Saletnik, B., Półka, M., & Gębicki, J. (2019). Influence of biochar on seed germination and plant growth—A review. Environmental Science and Pollution Research, 26(24), 24141–24150. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06103-z>
- Schulz, H., Dunst, G., & Glaser, B. (2013). *Positive effects of biochar on plant growth: a meta-analysis on pot experiments*. Plant and Soil, 376, 11–21.
- Sofo, A., Manfreda, S., Fiorentino, M., et al. (2024). Soil fertility and plant nutrition in an organic olive orchard after 5 years of amendment with compost, biochar or their blend. *Agriculture* (Basel), 14(1), 183.
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. Advances in Agronomy, 105, 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Sombroek, W., De Brito, M., & Fearnside, P. M. (2002). Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In J. Lehmann, D. C. Kern, B. Glaser, & W. I. Woods (Eds.), *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management* (pp. 125–139). Kluwer Academic Publishers.
- Sombroek, W.G. (1966). *Amazon Soils: A reconnaissance of soils of the Brazilian Amazon region*. Centre for Agricultural Publications and Documentation (PUDOC), Wageningen.
- Trupiano, D., Coccozza, C., Baronti, S., Amendola, C., Vaccari, F. P., Lustrato, G., ... & Scippa, G. S. (2017). The effects of biochar and its combination with compost on

- lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and microbial community. *International Journal of Agronomy*, 2017, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2017/3158207>
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9391-5>
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 300, 9–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9391-5>
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27(2), 205–212. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>

Résumé

Ce travail a permis de produire du biochar à partir des branches d'olive, en explorant différentes conditions de pyrolyse (400 °C) et durées de traitement (3, 4 et 5 heures). L'évaluation de la phytotoxicité du biochar sur l'orge et la laitue a montré que, dans la majorité des cas, il améliore significativement le taux de germination et les paramètres de croissance des plantules, sans effets toxiques notables.

De manière générale, l'intégration du biochar, en combinaison avec des biofertilisants, apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer durablement la productivité agricole tout en valorisant les résidus organiques.

Mots clés : biochar, pyrolyse, phytotoxicité, biofertilisants, la laitue l'orge, branche d'olive

Abstracts

This study enabled the production of biochar from olive tree branches under various pyrolysis conditions (400 °C) and treatment durations (3, 4, and 5 hours). The evaluation of biochar phytotoxicity on barley and lettuce showed that, in most cases, it significantly improved seed germination rates and seedling growth parameters without exhibiting any notable toxic effects.

Overall, the integration of biochar, particularly in combination with biofertilizers, appears to be a promising strategy for sustainably enhancing agricultural productivity while valorizing organic residues.

Key words : biochar , biofertilizers ,olive tree branches , pyrolysis, phytotoxicity, lettuce , barley

الملخص

أتاح هذا العمل إنتاج الفحم الكربوني من فروع شجر الزيتون، وذلك من خلال اختبار ظروف مختلفة للتحلل الحراري (عند 400 درجة مئوية) وفترات زمنية متعددة (3، 4، و5 ساعات). وقد أظهرت تقيييمات السمية النباتية للفحم الكربوني على نباتي الشعير والخس أن هذا الأخير ساهم، في معظم الحالات، في تحسين معدل إنبات البذور ومعايير نمو الشتلات بشكل ملحوظ، دون تسجيل أي تأثيرات سمية واضحة.

بشكل عام، يبدو أن دمج الفحم الكربوني ، لا سيما عند استخدامه مع الأسمدة الحيوية، يُعد إستراتيجية واعدة لتعزيز الإنتاجية الزراعية بشكل مستدام، مع تحقيق قيمة مضافة من خلال تثمين المخلفات العضوية.

الكلمات المفتاحية:

الفحم الكربوني، فروع شجر الزيتون، الخس الشعير، السمية النباتية ، التحلل الحراري ، الأسمدة الحيوية