

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



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 :

- ✓ Benattia Bouchra
- ✓ Guelilia Zohra
- ✓ Khelfa Ikram

Thème

Apport de biochar et de l'inoculation mycorhizienne
dans la lutte contre des champignons myco-
toxigènes du genre *Fusarium* chez la tomate

Soutenu publiquement, le : 03 juillet 2024

Jury :

Présidente : Mme. DAHLIA F.

Encadrant : M. YEZLI W.

Co-encadrante : Mme. ZEBBOUDJ N.

Examinatrice : Mme. BAROUAGUI S.

Grade

« MCA »

« MCA »

« MCB »

« MCB »

Année universitaire : 2023-2024

ملخص

ذبول الفيوزاريوز الوعائي هو مرض يصيب الطماطم، نظرا لقدرته على العيش في التربة مدة طويلة. هذا المرض تسببه سلالتان من الفطريات *Fusarium solani* و *Fusarium oxysporum*. تركز دراستنا على استخدام الفحم الحيوي لنشارة الخشب، من بين أنواع مختلفة من الفحم الحيوي وفقا لدرجات الحرارة (300، 400 و 500م) والتركيزات (0,5%_1%_2%_4%_8%). حسب التجارب المخبرية، على بذور الشعير والخس، يلعب هذا الفحم الحيوي دورا مهما في مكافحة الحيوية لمسببات الأمراض، مما يعزز نمو النبات، زيادة على تحفيز نمو النبات وتفكك المواد الضارة. أظهرت نتائج زرع السلالات الفطرية *Fusarium solani* و *Fusarium oxysporum* على الفحم الحيوي (300م/3 ساعة) أنه قام بتثبيط النشاط الفطري بنسبة 100%. كما أظهرت نتائج الزرع على وسط PDA + منقوع الفحم الحيوي أن هذا الوسط ساعد على نمو الفطر نموا ملحوظا. في هذا السياق، تظهر النتائج بوضوح فعالية الفحم الحيوي للحد من انتشار هذه الفطريات المسببة للأمراض وتأثير إيجابي لمنع نمو هذه الفطريات. من خلال العمل كعامل تحكم حيوي، يحد الفحم الحيوي من الانتشار الفطري مع الحفاظ على صحة جذور نباتات الطماطم. يفتح هذا النهج الواعد آفاقا جديدة للممارسات الزراعية المستدامة والصديقة للبيئة.

الكلمات المفتاحية:

ذبول الفيوزاريوز، الفحم الحيوي، *Fusarium solani*، *Fusarium oxysporum*، مكافحة البيولوجية.

Résumé

La fusariose vasculaire est une maladie majeure de la tomate, en raison de sa capacité à se maintenir dans le sol. Elle est causée par deux espèces de champignons *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*. Ainsi, la lutte biologique offre une alternative aux produits chimiques. Notre étude se concentre sur l'utilisation de biochar de sciure, parmi différents types de biochars selon les températures (300, 400 et 500°C) et les concentrations (0,5%_1%_2%_4%_8%). *In vitro* et dans des graines d'orge et de laitue. Ce biochar joue rôle crucial dans le biocontrôle des agents pathogènes, favorisant la croissance des plantes, en stimulant leur croissance, ainsi qu'à la dégradation des substances nocives. En agissant directement sur les souches de *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*, le biochar de (300°C/3h) inhibe la croissance de ces pathogènes. L'utilisation du macérat du biochar dans la préparation du milieu PDA influence fortement sa croissance. Dans ce contexte, les résultats démontrent clairement l'efficacité du biochar pour réduire la propagation de ces champignons pathogènes et un effet positif pour inhiber la croissance de ces champignons. En agissant comme un agent de biocontrôle, le biochar limite la colonisation fongique tout en préservant la santé des racines des plants de tomate. Cette approche prometteuse ouvre de nouvelles perspectives pour des pratiques agricoles durables et respectueuses de l'environnement.

Mots clés :

Fusariose vasculaire, Biochar, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, lutte biologique.

Abstract

Vascular fusarium wilt is a significant disease affecting tomatoes, primarily due to its persistence in soil and the increasing demand for healthy produce. This disease is caused by two fungal strains, *Fusarium oxysporum* and *Fusarium solani*. Biological control offers an alternative to chemical treatments. Our study examines the use of sawdust biochar, produced at various temperatures (300°C, 400°C, 500°C) and concentrations (0.5%, 1%, 2%, 4%, 8%), tested in vitro and on barley and lettuce seeds. This biochar plays a crucial role in biocontrol of pathogens and promoting plant growth by stimulating growth and breaking down harmful substances. Specifically, biochar produced at 300°C for 3 hours was tested directly on *Fusarium oxysporum* and *Fusarium solani* to enhance plant growth and indirectly to combat pathogens. Our results clearly demonstrate that biochar effectively reduces the spread of these pathogenic fungi and inhibits their growth. By acting as a biocontrol agent, biochar limits fungal colonization while preserving the health of tomato plant roots. This promising approach opens new perspectives for sustainable and environmentally friendly agricultural practices.

Keywords:

Fusarium wilt, Biochar, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium solani*, biological control.

Remerciements

*Nous exprimons d'abord nos profonds remerciements à **Dieu** qui nous a donné le courage et la volonté d'achever ce travail.*

*Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont à notre **Promoteur Dr. YEZLI W.** pour ses conseils, ses encouragements, sa patience, sa compétence, sa gentillesse, ses qualités humaines et scientifiques resteront pour nous un exemple, qui nous ont permis de bien mener ce travail. Le suivi et l'orientation dont nous avons pu bénéficier. Nous sommes constamment impressionnés de constater à quel point il nous a poussé pour atteindre nos buts et d'avoir identifié et stimulé nos potentiels.*

*Nos remerciements les plus sincères vont également à notre **Co-promoteur : Mme. ZEBBOUDJ N.** Veuillez trouver ici l'expression de nos profonds sentiments de respect pour le soutien que vous n'aviez cessé de nous porter.*

*Nos remerciements vont au président de jury **Mme. DAHLIA F.** merci de nous avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Un remerciement spécial pour son aide pratique et son soutien moral et ses encouragements pendant la réalisation de ce travail.*

*Nos vifs remerciements s'adressent aussi à **Mme. BAROUAGUI S.** qui a accepté d'examiner notre travail avec bienveillance et nous en sommes très honoré.*

Un grand merci à l'équipe du laboratoire de biotechnologie végétale et laboratoire de Microbiologie, pour leur gentillesse et serviabilité.

Dédicaces

Avant toute chose, je tiens à remercier Dieu le tout puissant, pour m'avoir Donné la force et la patience.

À ma chère maman FATIHA ; Pour ton amour infini, ton soutien inconditionnel et ta foi en mes rêves, je dédie ce mémoire. Ce travail est le témoignage de notre lien indéfectible et de l'amour qui m'anime grâce à toi. Merci pour tout ce que tu as sacrifié pour que je puisse atteindre ce moment. Tu es et seras toujours ma source d'inspiration et ma plus grande fierté.

À mon cher père AHMED ; Pour ton dévouement indéfectible, ton soutien et tes conseils précieux tout au long de ce parcours d'études, je dédie ce mémoire. Ce travail représente non seulement mes efforts, mais aussi l'héritage de tes enseignements et de ton amour. Merci pour ton soutien constant et ta foi en moi, même lorsque les défis semblaient insurmontables. C'est grâce à toi que je suis aujourd'hui sur le point de franchir cette étape importante de ma vie.

À mes chers frères NACER, Abdelkader, et ma seule sœur WAHIBA ; je souhaite honorer votre présence constante dans ma vie. Vos encouragements chaleureux, vos conseils avisés et votre soutien indéfectible ont été des phares dans les moments de doute et de difficulté.

A l'homme qui illumine ma vie de son amour tu as été ma force et ma motivation. Ta présence aimante et ton encouragement constant m'ont aidé à atteindre cette étape importante, merci pour ta patience, ta compréhension et pour être mon partenaire de vie et de rêves.

À mes chères petites neveux Ahmed, Fatima, Razan, Boualem et mon petit frère MEHDI, je souhaite vous dédier chaque page à vous qui illuminez ma vie de votre innocence et de votre sourire et votre douceur. Puissiez-vous grandir en force, en sagesse et en bonheur, et que notre lien familial continue de nous enrichir mutuellement.

À mon amie d'enfance Khaoula ; qui as partagé avec moi tant de souvenirs précieux depuis notre enfance. Ta présence constante, ton soutien inconditionnel et notre amitié durable ont été des piliers essentiels tout au long de mon parcours académique.

À l'amour de ma vie Nourhane ; celle qui illumine chaque jour de ma vie de son amour et de sa présence. Ta patience infinie, ton soutien inébranlable et ta compréhension profonde ont été mes piliers pendant cette période d'études.

À mes chers amis Zohra, Ikram , Inasse ; mes compagnons de route, mes partenaires dans les rires et dans les défis. Votre amitié précieuse a été une source de soutien inestimable tout au long de mon parcours académique.

BOUCHRA

Dédicaces

Grâce à Dieu qui m'a tracé la route et m'a donné le pouvoir et le courage de continuer jusqu'à la fin que dieu vous protège bonne santé.

Avec l'aide du bon dieu, tout puissant j'ai pu achevé ce modeste travail que je dédié à mes plus chers être au monde .

A mes chers parents :

A mon père <<Guelilia Ahmed >>,mon premier enseignant, à toujours été mon source de force pour affronter les différents obstacles.

A ma mère <<Bouzianneyamina>>je ne saurai point te

Remercie comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés, et ma source de force.

A mes chères sœurs < SOUAD ,IMENE >et à mon chère frère < HBIBE >.

A mes chère amies :Bouchra ,IKRAM ,INASE .

A mes très chères sœurs Yagout et Imene .

Enfin à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail ,merci infiniment.

ZOHRA

Dédicaces

Au nom de Dieu, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux Louange à Dieu pour le début et la fin, par amour, satisfaction et gratitude (Et mes dernières prières vont à louer Dieu)

Notre début n'a pas été un voyage court ni un chemin rempli de facilités, mais je l'ai fait, alors loué soit Dieu, louange abondante.

Tous remerciements, appréciations et respect pour toi, ma mère, et tu es la lumière de ma vie qui l'éclaire. Tu es le chemin qui me guide, Père, vers le bon chemin. Avec tout mon amour et toute ma tendresse, je dédie mon cadeau de fin d'études à mon père et à ma mère, car chacun d'eux a veillé à mon confort et à mon bonheur et a été la raison de mon succès après Dieu Tout-Puissant.

À ceux qui m'ont tant apporté leurs connaissances et leurs expériences de vie... mes distingués professeurs Dr Yezli et Dr Dahlia.

À ceux qui ont partagé ma douleur et mon espoir, mes succès et mes échecs, fidèles amis universitaires.

A ceux qui ont été témoins avec moi des difficultés des études et des nuits blanches, qui ont été pour moi la meilleure aide sur mon chemin... mes chers frères.

A celle auprès de qui j'ai appris à aimer la vie... ma sœur bien-aimée Intissar

Aux amis des situations, pas des années, partenaires du long chemin et de l'ambition lointaine... amis bien-aimés des études

À celles qui m'ont tenu la main quand la vie a cessé de me tendre la main... mes chères sœurs

Aux compagnons des étapes de la réussite, en commençant par la première étape et entérinant par la dernière étape... mes chers

IKRAM

Table des matières

Liste des Tableaux	i
Liste des Figures	ii
Liste des abréviations	iv
Introduction Générale	1
Chapitre I : Matériel & Méthodes.....	4
I.1. Objectif du travail.....	4
I.2. Date et lieu de travail	4
I.3. Matériel et produits utilisés	4
I.3.1. Matériel végétal.....	4
I.3.2. Souches fongiques.....	4
I.3.3. Milieux de culture	4
I.3.4. Autre matériel.....	4
I.4. Protocole expérimental.....	5
I.4.1. Phytotoxicité de Biochar	6
I.4.1.1. Préparation du matériel	6
I.4.1.2. Mise en place de l'expérience.....	7
I.4.1.2. Analyse statistique.....	11
I.4.2. Lutte biologique in vitro contre <i>Fusarium</i>	12
I.4.2.1. Test antifongique.....	12
Chapitre II : Résultats & Discussion	15
II.1. Résultats et discussion	15
II.1.1. Phytotoxicité de biochar	15
II.1.1.1. Germination eau gélosé (orge).....	15
II.1.1.2. Germination eau gélosé laitue.....	19
II.1.1.3. Germination des plantes sable (orge).....	24
II.1.1.4. Germination laitue sable	28
II.1.1.5. Croissance sur eau gélosée plus sable (orge).....	32

II.1.1.6. Croissance eau gélosée (laitue).....	43
II.1.2. Lutte biologique contre <i>Fusarium</i>	46
II.1.2.1. Influence du milieu de culture sur la croissance fongique.....	46
II.1.2.2. Evolution sur milieux.....	47
II.2. Discussion.....	49
Conclusion Générale.....	52
Références bibliographiques.....	53
Annexes	57

Liste des Tableaux

Tableau N° 1: Appareillage, verrerie et produits utilisés.	4
---	---

Liste des Figures

Figure N° 1: Schéma du protocole expérimental.	6
Figure N° 2: Agitation de mélange.....	7
Figure N° 3: Préparation de macérat du biochar. A : Macération, B : Incubation des flacons, C : Autoclavage, D : Coulage des milieux gélosés.	8
Figure N° 4: Arrosage de sable + biochar dans les pots.....	9
Figure N° 5: Isolement à partir des graines la laitue et l'orge dans les boîtes de Pétri. A : placement d'orge, B : placement de laitue sur les boîtes.	10
Figure N° 6: Préparation des milieux de culture.	13
Figure N° 7: Repiquage des champignons <i>Fusarium oxysporum</i> et <i>Fusarium solani</i> sur les milieux de culture.	14
Figure N° 8: Pourcentage de germination d'orge après 20h ; eau gélosée.....	15
Figure N° 9: Pourcentage de la germination d'orge après 44h ; eau gélosée.....	16
Figure N° 10: Pourcentage de germination d'orge après 68h ; eau gélosée.....	17
Figure N° 11: Poids frais moyen des plantules (g) ; eau gélosé orge.....	18
Figure N° 12: Poids sec moyens des plantules (g) ; eau gélosée orge	19
Figure N° 13: Pourcentage de germination de laitue après 20h ; eau gélosée.....	20
Figure N° 14: Pourcentage de germination de laitue après 44h ; eau gélosée.....	21
Figure N° 15: Pourcentage de germination de laitue après 68h ; eau gélosée.....	22
Figure N° 16: Poids frais moyen des plantules (g) ; eau gélosé laitue	23
Figure N° 17: Poids sec moyen des plantules (g) ; eau gélosée laitue	24
Figure N° 18: Pourcentage de germination après 44h ; sable (orge).....	25
Figure N° 19: Pourcentage de germination après 68h ; sable (orge).....	26
Figure N° 20: pourcentage de germination après 92h ; sable (orge).....	27
Figure N° 21: Poids frais moyen des plantules d'orge sable.....	27
Figure N° 22: Poids sec moyen des plantules orge sable	28
Figure N° 23: Pourcentage de germination après 44h sable (laitue).	29
Figure N° 24: Pourcentage de germination après 68h sable (laitue).	30

Figure N° 25: Pourcentage de germination après 92h sable laitue.....	30
Figure N° 26: Poids frais moyen des plantules (g) sable laitue.....	31
Figure N° 27: Poids sec moyen des plantules (g) sable laitue.....	32
Figure N° 28: Longueur des racines au j3 de germination (orge).....	33
Figure N° 29: Longueur des racines au j8 de germination (orge).....	34
Figure N° 30: Nombre de racines au j3 de germination (orge).....	34
Figure N° 31: Nombre de racines au j8 de germination (orge).....	35
Figure N° 32: Longueur de coléoptile après j3 de germination (orge).....	36
Figure N° 33: Longueur des coléoptiles après 8jours de germination (orge).....	37
Figure N° 34: Longueur de feuille après huit jours de germination (orge).....	38
Figure N° 35: Longueur des racines au j3 de germination (orge).....	39
Figure N° 36: Longueur des racines au j8 de germination (orge).....	39
Figure N° 37: Nombre des racines au j3 de germination (orge).....	40
Figure N° 38: Nombre des racines au j8 de germination (orge).....	41
Figure N° 39: Longueur des coléoptiles après 3 jours de germination.....	41
Figure N° 40: Longueur de la partie aérienne « coléoptiles » après huit jours de germination.....	42
Figure N° 41: Longueur de la feuille après huit jours de germination.....	43
Figure N° 42: Longueur des racines au j3 de germination.....	43
Figure N° 43: Longueur des racines au j8 de germination (laitue).....	44
Figure N° 44: Longueur des coléoptiles après 3 jours de germination (laitue).....	45
Figure N° 45: Longueur des coléoptiles après 8 jours de germination (laitue).....	46
Figure N° 46: la croissance radiale de <i>Fusarium</i> pendant 7jours.....	47
Figure N° 47: La distance radiale (cm) de <i>Fusarium</i> pendant 7jours sur les milieux.....	48

Liste des abréviations

ANOVA	Analyse de variance.
ddl	Degrés de liberté
F	<i>Fusarium</i>
FAO STAT	Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database
J	Jour
L	Laitue
ns	Non significatif.
Or	Orge
P	Probabilité ou signification
PDA	Potato Dextrose Agar
PSA	Poids sec.
S	Solani
sp	Espèce

Introduction

Générale

La tomate est largement acceptée comme l'une des cultures maraichères les plus importantes et les plus commercialiser en raison de ses niveaux de haute valeur nutritionnelle, propriétés antioxydantes ainsi que de guérison (**Biswas et al., 2012**).

La tomate est susceptible aux maladies provoquées par des moisissures, bactéries et virus, affectant les feuilles, les fruits et les racines. Les infections virales peuvent retarder la croissance et réduire la production, entraînant des pertes significatives de récolte (**Naika et al., 2005**).

La majorité des espèces pathogènes de *Fusarium* identifiées sont regroupées dans les complexes d'espèces *F. oxysporum* et *F. solani* (**O'Donnell et al., 2015**).

La pourriture racinaire, causée par *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* représente l'une des maladies les plus destructrices pour les plants de tomate. Les dommages causés par cet agent pathogène peuvent entraîner une diminution significative du rendement ou même la perte totale des cultures dans les cas les plus graves (**Akladiou et al., 2015**).

En outre, les espèces de *Fusarium* sont répertoriées non seulement en Algérie, mais également dans diverses régions du monde, où elles sont reconnues pour leur pathogénicité sur différentes espèces végétales (**Mannai et al., 2018 ; Rezaee et al., 2018**).

L'espèce la plus commune est *Fusarium oxysporum*. La microflore fongique des sols cultivés est composée des formes phytopathogènes les plus courantes et les plus importantes. Selon **Dean et al. (2012)**, *F. oxysporum* est un groupe d'espèces ubiquistes qui regroupe plusieurs formes spéciales (f. sp.), qui sont responsables de différentes maladies, notamment le flétrissement vasculaire, qui se manifeste par une inflammation des plantes causée par l'envahissement des vaisseaux du xylème par le pathogène.

L'agent pathogène *Fusarium solani* est responsable de maladies sur une variété étendue et variée de plantes hôtes. Elle cause des maladies chez une centaine de genres de plantes où il est fréquemment lié à des pourritures racinaires. Les cultures maraichères, les légumineuses et les cucurbitacées sont les hôtes les plus courants (**O'Donnell, 2000**).

Pour combattre les maladies des tomates causées par les espèces de *Fusarium*, les fongicides chimiques sont couramment employés, malgré leurs impacts néfastes sur l'environnement et la santé humaine, nécessitant leur remplacement (**Barnard et al., 1997**).

Diverses stratégies alternatives, notamment le contrôle biologique, sont privilégiées pour répondre à ces défis (**Karimi et al., 2012**).

Ainsi, il est essentiel de concevoir de nouvelles stratégies de lutte efficaces, qui ne mettent pas en péril la sécurité environnementale, c'est ce qu'on appelle « la lutte biologique » qui repose sur la compétition pour les nutriments essentiels, sur l'activité antagoniste à la croissance des pathogènes en produisant des antibiotiques ou des enzymes et/ou en stimulant les systèmes de défense chez l'hôte végétal (**Rakotoarimanga et al., 2014 ; Silva et al., 2017**).

Dans la lutte biologique, plusieurs approches sont utilisées, notamment l'utilisation d'huiles essentielles (**Bakkali et al., 2008 ; Lang et Buchbauer, 2012 ; Hu et al., 2017 ; Yakoubi et al., 2019**) et de micro-organismes antagonistes (**Zebboudj et al., 2014 ; Yezli et al., 2015 ; Zebboudj et al., 2021**). L'utilisation d'extraits de plantes est particulièrement prometteuse, étant reconnue pour sa grande efficacité, sa sécurité et son respect de l'environnement dans la lutte contre les agents pathogènes affectant les tomates mûres (**Nasrin et al., 2018**).

L'utilisation de biochar est l'une des méthodes de lutte biologique les plus sûres et plus efficaces pour une activité antifongique vis-à-vis les agents pathogènes chez les plantes (**ARTB, 2022**).

L'idée que l'incorporation de biochar dans le sol pourrait être une méthode pour gérer les maladies des plantes a également suscité l'intérêt. L'utilisation du biochar pour la séquestration est une solution temporaire qui peut équilibrer l'augmentation de la production gazière. Il s'agit d'une méthode d'énergie renouvelable qui stocke du carbone, Lorsqu'il est lié à la production de bioénergie, cela réduit les émissions (**Lehmann, 2007**).

D'après le projet mondial sur le biochar, ce matériau est un sous-produit à forte teneur en carbone issu de la pyrolyse, reconnu pour favoriser la croissance des plantes tout en réduisant fréquemment l'incidence des maladies végétales (**Elad et al., 2011**).

Des études ont démontré que l'ajout de biochar au sol peut réduire la dégradation et l'érosion des sols en améliorant leur structure et leur capacité à retenir l'eau (**Sombroek et al., 2003**).

D'après plusieurs recherches, le biochar favorise la présence de microorganismes bénéfiques, ce qui permet de maintenir les nutriments essentiels pour les plantes (**Atkinson et al., 2010**). De plus, il est reconnu pour sa capacité à protéger les plantes contre les attaques

des agents phytopathogènes (**Elmer et Pignatello, 2011; Graber et Elad, 2013**), contribuant ainsi à augmenter la productivité des cultures (**Jaiswal et al., 2014**).

Les études menées par **Elmer et Pignatello (2011)** indiquent que l'ajout de biochar au sol fonctionne efficacement comme un moyen de lutte contre *Fusarium oxysporum*. Le biochar favorise également une augmentation notable de la colonisation racinaire par les champignons mycorhiziens arbusculaires, atteignant un taux de 100 % chez les plants d'asperges.

Dans ce cas-là, nous allons examiner le biochar, en particulier le biochar de sciure de bois, et son efficacité antifongique contre deux espèces de *Fusarium* chez la tomate.

C'est dans ce contexte que nous avons proposé, dans le cadre de l'achèvement d'un projet de fin d'études en Master Toxicologie et sécurité alimentaire. Le présent travail consiste donc à étudier *in vitro*, par potentialité de biochar à inhiber la croissance fongique de *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* deux agents pathogènes affectant la tomate.

Chapitre I : Matériel & Méthodes

I.1. Objectif du travail

Le présent travail porte sur l'apport de biochar dans la lutte biologique contre les champignons myco-toxinogènes du genre *Fusarium* chez la tomate

I.2. Date et lieu de travail

Ce travail a été réalisé durant la période du 24 Janvier jusqu'au Mars 2024, au niveau du laboratoire de Biothecnologie Végétale et de Microbiologie à la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (Université Ibn Khaldoun-Tiaret).

I.3. Matériel et produits utilisés

I.3.1. Matériel végétal

Dans notre étude, nous avons utilisé deux types d'échantillons de matière végétale (laitue et orge) et le sol pour la phytotoxicité de biochar. Le sol utilisé dans notre expérimentation c'est le sable qui a subi un séchage et tamisage (5 mm de diamètre) de façon à obtenir une granulométrie ni trop fine ni trop grosse.

I.3.2. Souches fongiques

Pour le test antifongique, la souche *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* étaient utilisées comme champignon mycotoxinogènes. Ce dernier attaque les parties racinaires de la tomate.

I.3.3. Milieux de culture

Dans notre étude nous avons utilisé de trois milieux de culture synthétiques (PDA ; PDA + Macérat du biochar et Milieu Biochar) (Annexe 1).

I.3.4. Autre matériel

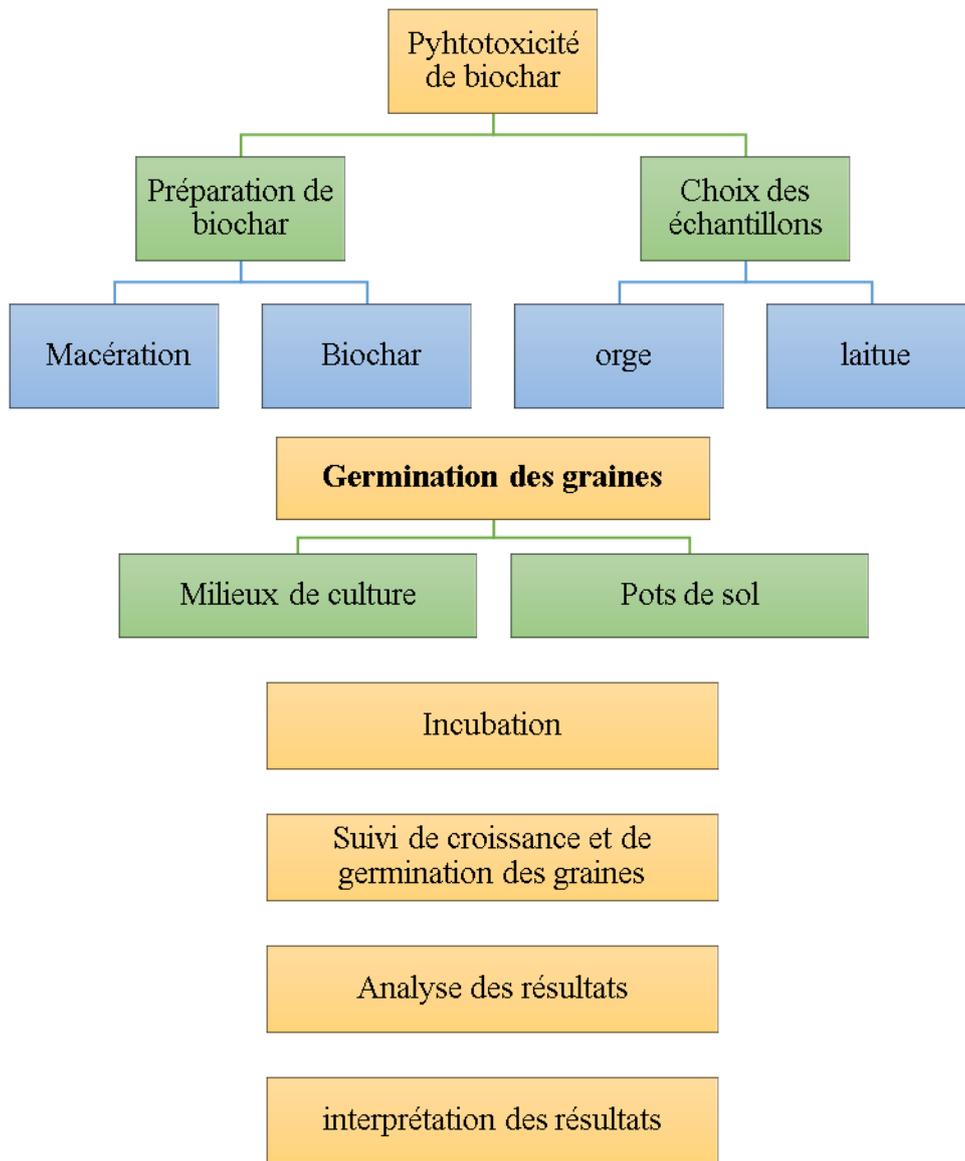
L'appareillage, la verrerie et les produits utilisés dans cette étude sont représentés sur le Tableau n° 01.

Tableau N° 1: Appareillage, verrerie et produits utilisés.

Verreries	Appareillages	Produits	Autres
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Barreau magnétique ▪ Bec Bunsen ▪ Béchers ▪ Boîtes de Pétri ▪ Eprouvettes ▪ Flacons 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autoclave «WOLFVESKZEUG- VORRICHLUGSUN 7340 GEILINGEN » ▪ Agitateur magnétique «IKAMAG » 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eau distillée ▪ Eau distillée stérile ▪ Eau de javel ▪ Ethanol 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biochar ▪ Spatule ▪ Pots de culture ▪ Pissette

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pince de platine ▪ Flacons stériles ▪ Erlenmeyer ▪ Fiole jaugée ▪ Entonnoirs liquides ▪ Capsule 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Balance de précision ▪ Incubateur ▪ Four Pasteur «HERAEUS» ▪ Réfrigérateur 		
--	---	--	--

I.4. Protocole expérimental



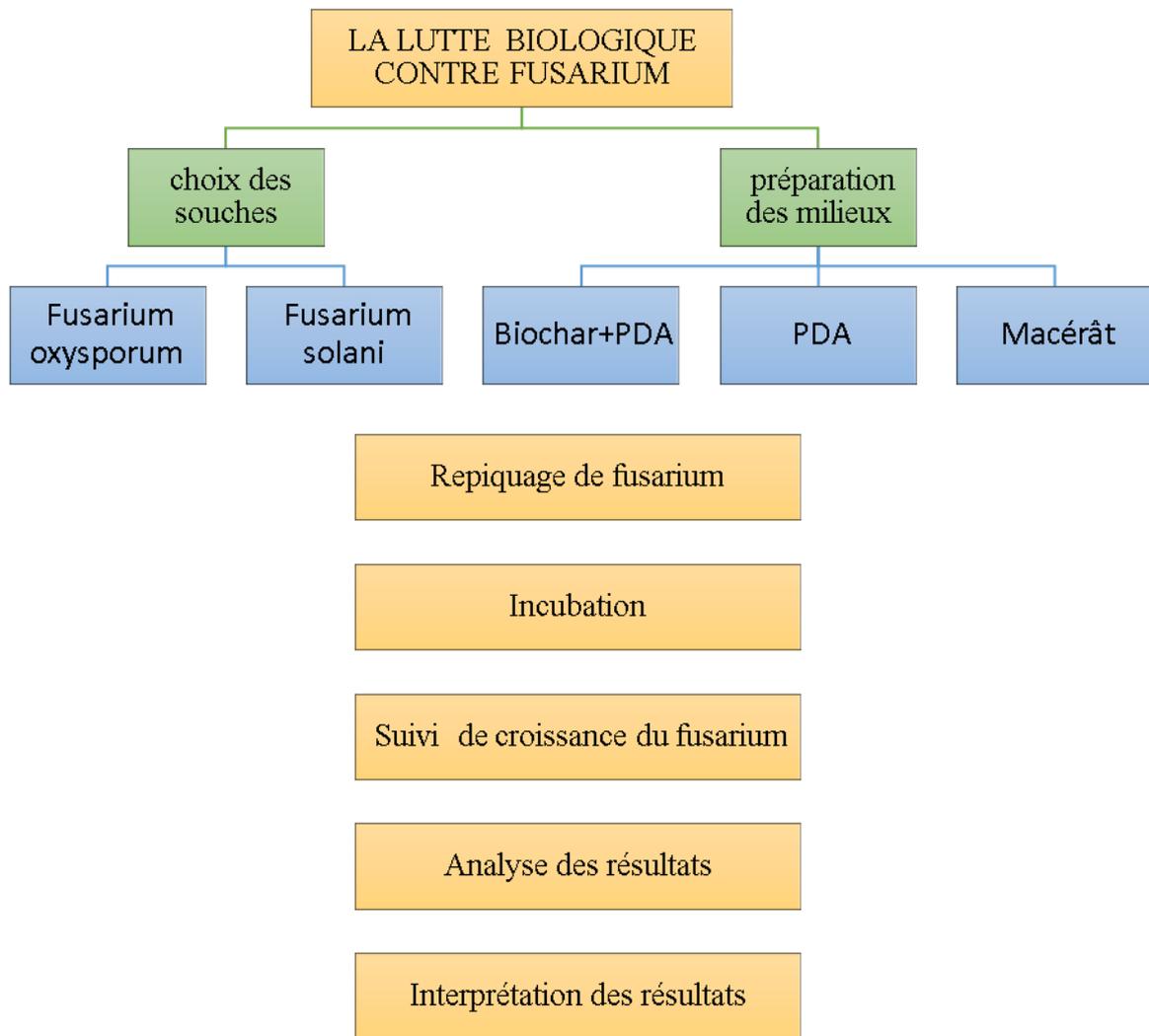


Figure N° 1: Schéma du protocole expérimental.

I.4.1. Phytotoxicité de Biochar

I.4.1.1. Préparation du matériel

➤ Acquérir le biochar

La production du biochar a nécessité la Carbonisation de la sciure de bois à des températures de 300°C ,400°C,500°C pendant des différentes périodes de trois heures, quatre heures et cinq heures en l'absence d'oxygène dans le four. L'objectif est de carboniser la sciure de bois de manière contrôlée sans la brûler. Après avoir chauffé pendant un certain temps la sciure de bois, le four a été éteint, Après avoir refroidi, on peut retirer le biochar du récipient et l'utiliser comme amendement pour le sol ou dans d'autres utilisations agricoles ou éducatives.

I.4.1.2. Mise en place de l'expérience

➤ Préparation de macérât du biochar

Pour préparer le Macérât de chacun des trois échantillons de biochar à différentes températures (300°, 400°, 500°). 20 grammes de biochar de sciure de bois étaient prélevés, ajoutant 250 ml d'eau distillée et ils étaient placés sur une plaque chauffante agitatrice pendant 24 heures, cycle à froid à une vitesse de 800 tr/min, le jour 24 janvier 2024 à 10 :09 am.

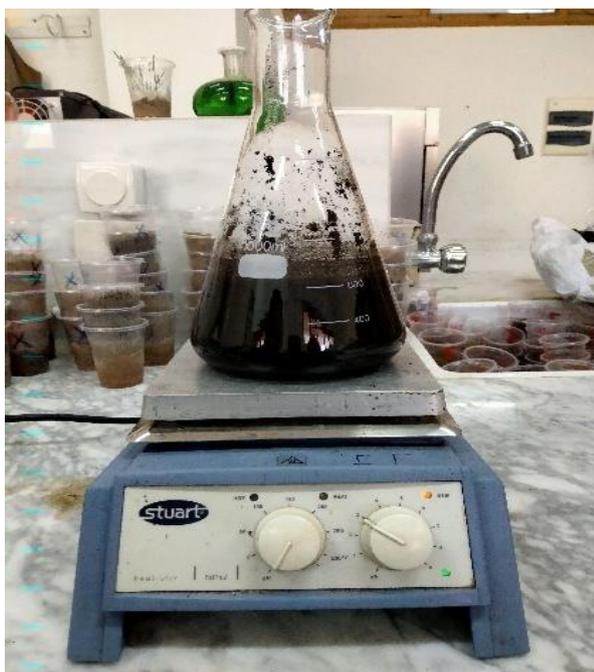


Figure N° 2: Agitation de mélange

Après 24 heures, le mélange a été filtré, le Macérât était versé dans des 5 flacons à différentes durées (3 heures, 4 heures et 5 heures) et différents volumes, ou le premier flacon contient 80 ml de Macérât, Le deuxième contient 40 ml, le troisième contient 20 ml, le quatrième contient 10 ml et le cinquième contient 5 ml. Les solutions étaient diluées avec de l'eau distillée jusqu'à atteindre un volume de 80 ml dans chaque flacon sous forme de concentrations, c'est-à-dire dans l'ordre (8%, 4%, 2%, 1% et 0,5%). 0,8 grammes d'agar-agar était ajoutés au bouillon de macérât dans chaque flacon, les flacons étaient placés au four à une température de 150° jusqu'à ce qu'il soit homogène et que l'agar-agar se dissolve. Ces derniers contenant du milieu de culture ont été stérilisés dans un autoclave pendant 15 minutes. Ce processus vise à éliminer tout micro-organisme susceptible de contaminer les cultures ultérieures. Une fois la stérilisation achevée, 15 ml de milieu de culture ont été répartis dans chaque boîte de Pétri. Le milieu a ensuite été laissé à solidifier.

90 boîtes de Pétri (45 grandes pour l'orge) (45 petites pour la laitue), trois répétitions pour chaque concentration et durée dans les boîtes de Pétri grandes et petites. le jour 28 janvier 2024



(A)



(B)



(C)



(D)

Figure N° 3: Préparation de macérat du biochar. A : Macération, B : Incubation des flacons, C : Autoclavage, D : Coulage des milieux gélosés.

Application de la différente quantité de biochar avec des différentes quantités de sable en fonction à les concentrations précédentes, le poids total de mélange est 50 g. Le jour 12 février 2024.

Les quantités ci-dessous :

Concentration	Quantité de bio char	Quantité de sable
0,5%	0,25gr	49 ,75gr
1%	0 ,50gr	49 ,50gr
2%	01gr	49gr
4%	02gr	48gr
8%	04gr	46gr

- Trois pots pour chaque concentration (orge).
- Trois pots pour chaque concentration (laitue).
- Arrosage régulier avec 10 ml d'eau distillée pour chaque pot avant 24 h de placement des graines d'orge et de laitue.



Figure N° 4: Arrosage de sable + biochar dans les pots.

➤ **Isolement à partir des graines la laitue et l'orge dans les boites de Pétri**

Les graines d'orge et de la laitue étaient différenciées en différents groupes expérimentaux en fonction à des concentrations de biochar (0.5%, 1% ,2% ,4% ,8%) à évaluer et des groupes témoins pour chacun des trois biochars a des températures différentes (300 ,400 ,500). 21 graines ont été prélevées à partir de chaque échantillon dans des conditions aseptiques, les graines sont directement désinfectées avec l'eau de javel pendant trois minutes. Les graines ont été rincées trois fois avec l'eau distillée stérilisée pour éliminer

les traces de l'eau de javel. Après rinçage, 21 graines d'orge ont été placés avec une pince sur les milieux de culture dans chaque boîte de pétri grande en trois répétitions pour chaque concentration et 21 graines de laitue dans chaque boîte de pétri petite, en trois répétitions pour chaque concentration. Le jour 28janvier 2024.

Les boîtes de pétri ont été incubées à 28C° pendant 8 jours. Durant cette période, un suivi quotidien a été effectué.



(A)



(B)

➤ **Figure N° 5: Isolement à partir des graines la laitue et l'orge dans les boîtes de Pétri. A : placement d'orge, B : placement de laitue sur les boîtes.**

➤ **Placement des graines d'orge et de la laitue dans les pots**

Déposer 11 graines d'orge dans chaque pot, en trois répétitions pour chaque concentration et 15 graines de laitue dans chaque pot en trois répétitions pour chaque concentration. Le jour 28janvier 2024.

➤ **Conditions de croissance des graines**

Cultiver les graines en boîtes de Pétri et en pots de culture exige des conditions précises pour une germination et une croissance optimale.

La température (21.5-25°C), l'humidité (utiliser des couvercles, arrosage dans les pots), la lumière et l'aération doivent être soigneusement contrôlés.

➤ **Suivi de la croissance et germination des graines**

Après 24 h de placement :

Durant ce test, les plantules étaient suivies régulièrement pour noter l'évolution des symptômes.

Pendant les trois premiers jours la germination des graines dans les boîtes de pétri et les pots était notée c'est-à-dire que le nombre total de graines qui ont germé par rapport au nombre total de graines testées.

Les paramètres étudiés dans le troisième jour et le huitième jour sont : Nombre et la longueur de radicules, la longueur de la coléoptile, la longueur de la feuille verte sauf que la laitue n'a pas de radicules nombreuses, Les poids frais et sec des biomasses aériennes et racinaires ont été déterminés le huitième jour seulement.

Les longueurs des parties racinaires et parties aériennes ont été déterminées à l'aide d'une règle en décimètres, cet outil permet une mesure précise de la longueur.

Les poids frais et secs des parties aériennes (feuilles, tiges) et des racines des plantes a été mesuré à l'aide d'une balance de précision.

I.4.1.2. Analyse statistique

Les résultats expérimentaux ont été analysés et présentés graphiquement à l'aide du logiciel Microsoft Office Excel 2007. Pour évaluer la pertinence des observations, une analyse de variance (ANOVA) a été employée pour examiner l'effet de biochar sur la croissance des graines. Un niveau de signification de 5 % ($P < 0.05$) a été utilisé pour interpréter les résultats de manière statistique.

- Haut du formulaire
- Bas du formulaire.

I.4.2. Lutte biologique *in vitro* contre *Fusarium*

Pour l'essai d'efficacité *in vitro* de biochar contre *Fusarium*, *F. oxysporum* et *F. solani* ont été utilisés. L'activité antifongique vis-à-vis de deux champignons mycotoxinogènes a été étudiée par la méthode de co-culture sur trois milieux (PDA ; PDA + Macérat du biochar et Milieu biochar).

I.4.2.1. Test antifongique

➤ **Protocole expérimental**

- Deux répétitions de témoin de *F. oxysporum* sur milieux PDA.
- Deux répétitions de témoin de *F. solani* sur milieux PDA.
- Trois répétitions de *F. oxysporum* sur milieux mixte (PDA + macérât).
- Trois répétitions de *F. solani* sur milieux mixte (PDA + macérât).
- Trois répétitions de *F. oxysporum* sur milieux mixte (Milieu biochar).
- Trois répétitions de *F. solani* sur milieux mixte (Milieu biochar).

➤ **Choix de biochar :**

Le biochar sélectionné pour cette étude est issu d'une pyrolyse à 300°C pendant 3 heures. Ce choix offre un équilibre optimal entre stabilité, efficacité, économie et gain de temps, le rendant idéal pour une utilisation agricole.

➤ **Préparation de milieux de culture :**

- **Préparation de Milieu PDA :** (Potato Dextrose Agar)
- **Le milieu de culture PDA** (Potato Dextrose Agar) été préparé en portant à ébullition, pendant 15 minutes, 17,55g de dextrose était ajoutés au 450ml d'eau distillé, Le mélange était placé par la suite sur une plaque chauffante agitatrice à 121°C pendant 15min jusqu'à l'obtention d'une solution homogène.
- **Préparation de milieu de biochar :** une quantité de 17,55 Gramme du biochar (300/3H) était ajoutée avec 10 g d'agar 10 au 450ml d'eau distillé, le mélange était placé par sur une plaque chauffante agitatrice à 121°C pendant 15 min jusqu'à l'obtention d'une solution homogène.
- **Préparation de milieux macérat + PDA :** Une quantité de 17 ,55 g était ajoutée au 450ml de macérat de biochar, le mélange était placé par sur une plaque chauffante agitatrice à 121°C pendant 15min jusqu'à l'obtention d'une solution homogène.

Les milieux de culture obtenus étaient versés dans trois flacons pour chaque milieu, ces derniers étaient autoclavés à 121°C pendant 15min pour but de stérilisation. Une fois la

stérilisation terminée, les milieux de culture étaient distribués dans des boîtes de Pétri à raison de 15ml par boîte et laissé se solidifier.



Figure N° 6: Préparation des milieux de culture.

➤ **Repiquage du champignon**

Après que le milieu de culture ait refroidi, Chaque mycélium développé a été repiqué, à l'aide d'une anse de platine stérile et déposé au centre de chaque boîte de Pétri, selon le schéma illustré en figure 07. Plusieurs boîtes de Pétri ont été préparées de cette manière, puis incubées à 28 °C pendant 8 jours dans une étuve ventilée.

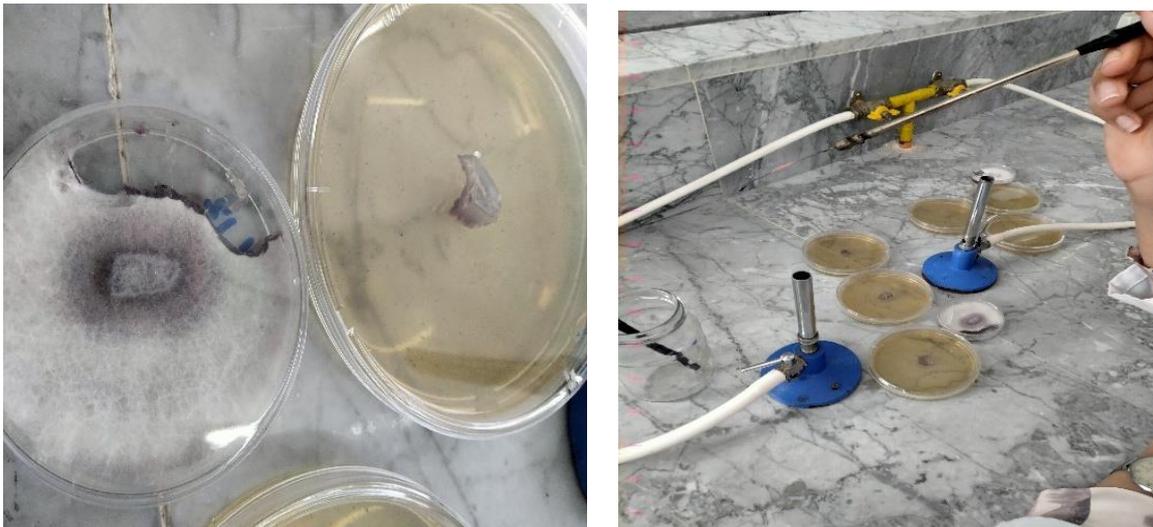


Figure N° 7: Repiquage des champignons *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* sur les milieux de culture.

➤ **Suivi de croissance de *Fusarium***

La croissance mycélienne du pathogène a été évaluée chaque 24h, pendant 4 jours, en mesurant sur la distance radiale (diamètre) de la colonie pour évaluer l'effet de biochar sur la croissance fongique de *Fusarium* dans chaque milieu.

➤ **Analyse statistique**

Les résultats expérimentaux ont été analysés statistiquement et graphiquement à l'aide du logiciel Microsoft Office Excel 2007. Pour évaluer la significativité des observations, l'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisée afin de déterminer l'effet des facteurs sur la croissance et l'inhibition fongique. Un seuil de signification de 5 % ($P < 0.05$) a été appliqué dans cette analyse.

Chapitre II : Résultats & Discussion

II.1. Résultats et discussion

II.1.1. Phytotoxicité de biochar

Après l'incubation pendant 3 à 7 jours, nous avons remarqué la germination des graines (l'orge et laitue) et la croissance des graines

II.1.1.1. Germination eau gélisée (orge)

➤ Germination eau gélisée après 20h

Le graphique présenté illustre l'effet de la concentration de biochar et de la température de carbonisation et la durée de carbonisation sur le pourcentage de germination d'orge eau gélisée après 20 heures d'incubation.

Les résultats présentés suggèrent que l'utilisation de biochar peut avoir un effet positif sur la germination de l'orge en eau gélisée. L'effet optimal du biochar semble dépendre de la concentration et de la température de carbonisation. Les concentrations de biochar de 1% et 2% et les températures de carbonisation de 300°C et 400°C semblent favoriser une germination optimale. La durée de carbonisation ne semble pas avoir d'effet significatif sur la germination pour les concentrations et températures optimales. En revanche, pour la température de carbonisation de 500°C, l'effet du biochar sur la germination est moins prononcé, voire légèrement négatif pour les concentrations élevées (4% et 8%). et pour la ligne grise montre le groupe témoin sans biochar qui révèle une déférence non significative selon l'augmentation de germination des graines (Figure n°08).

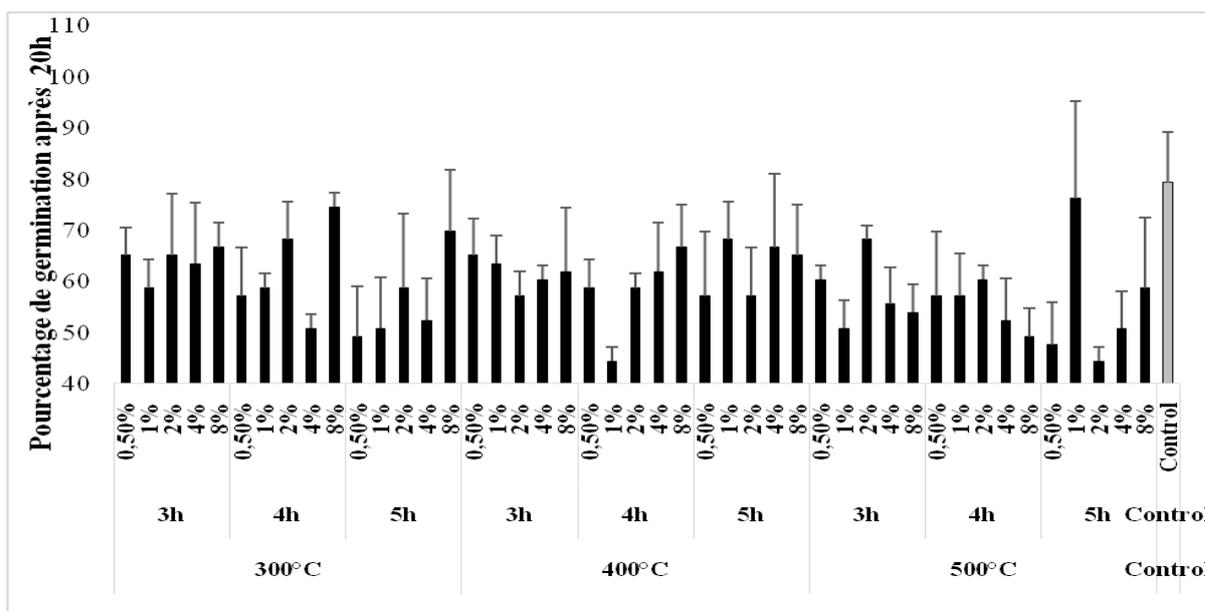


Figure N° 8: Pourcentage de germination d'orge après 20h ; eau gélisée

➤ Germination eau gélosé après 44h

Les résultats suggèrent que le biochar peut être un amendement utile pour améliorer la germination des cultures d'orge. On observe une augmentation générale du pourcentage de germination pour toutes les conditions testées avec l'augmentation du temps d'incubation de 20 à 44 heures. Cela suggère que la germination de l'orge est un processus continu qui se déroule sur plusieurs jours. On observe une tendance à une augmentation du pourcentage de germination avec l'augmentation de la concentration de biochar et les températures basses. Cet effet est plus prononcé pour les températures de carbonisation les plus basses (300°C et 400°C). À la température de carbonisation la plus élevée (500°C), l'effet du biochar est moins marqué, voire négatif pour certaines concentrations. L'effet du biochar sur la germination ne semble pas être significativement influencé par la période de carbonisation. et pour les témoins les résultats montrent une augmentation de germination des plantes est approximativement égale à celle des plantes expérimentées. En comparant les deux graphiques, on peut observer que l'effet du biochar sur la germination est plus important après 44 heures d'incubation qu'après 20 heures. Cela suggère que le biochar a un effet positif sur la germination des graines d'orge sur le long terme (Figure n°09).

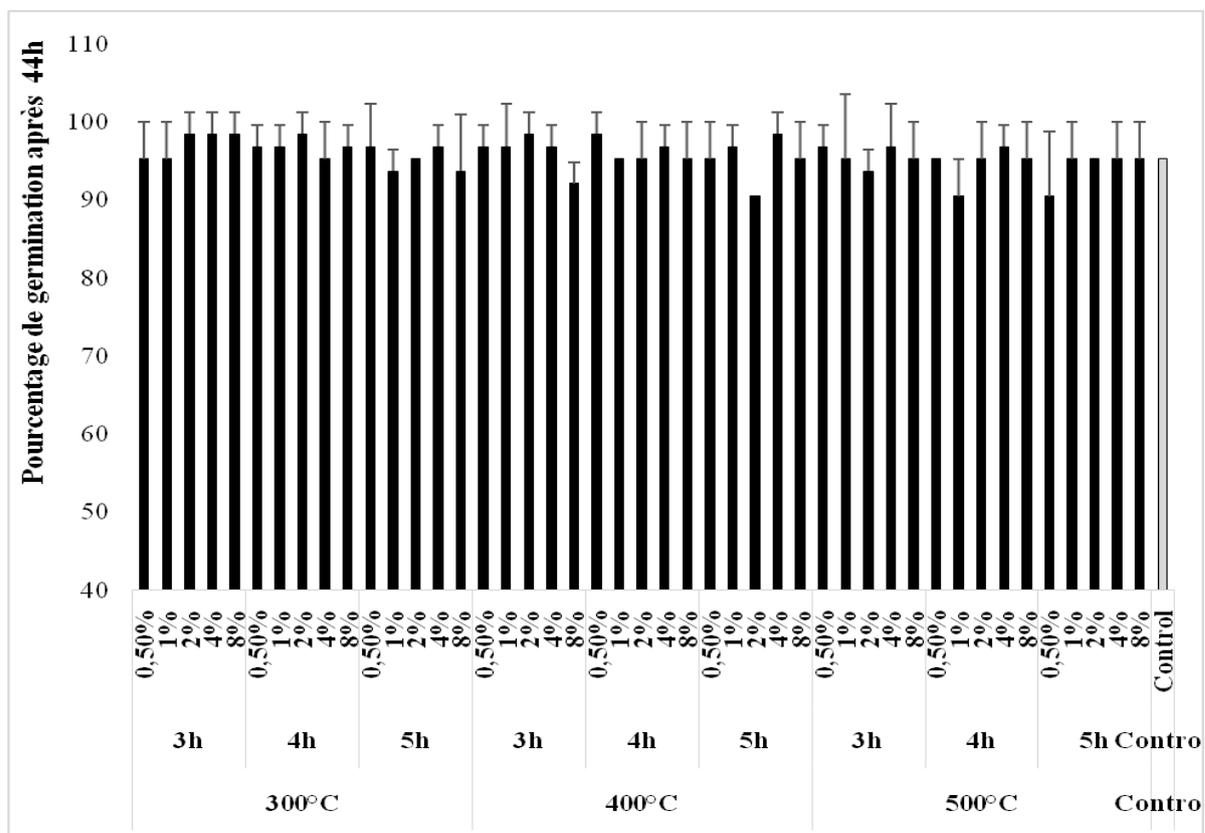


Figure N° 9: Pourcentage de la germination d'orge après 44h ; eau gélosée.

➤ Germination d’orge après 68h (eau gélosée)

Le graphique montre que la concentration de biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation ont un effet significatif sur le pourcentage de germination d'orge eau gélosée. Les résultats suggèrent que la meilleure combinaison pour obtenir un pourcentage de germination élevé est une concentration de biochar faible, une température de carbonisation élevée et une durée de carbonisation courte, et pour les témoins une augmentation de germination significative (Figure n°10).

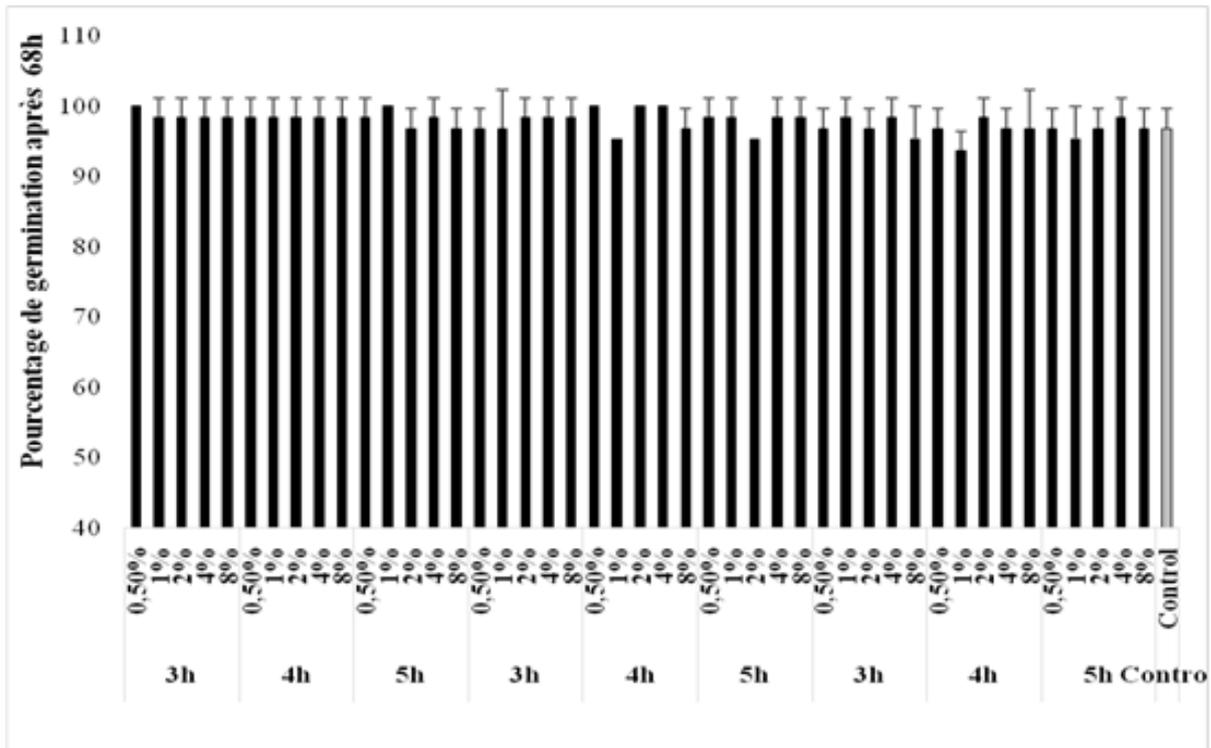


Figure N° 10: Pourcentage de germination d’orge après 68h ; eau gélosée

➤ Poids moyen frais des plantes (orge)

Cet histogramme suggère que le macérat de biochar peut avoir un effet positif sur la croissance des plantules d'orge, avec une concentration optimale potentielle pour laquelle le poids frais moyen des plantules est le plus élevé. le poids frais a significativement augmenté grâce à l’effet bénéfique de macérat de biochar ,les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 400°C,concentration 4%, durée 5h avaient les poids frais plus importants avec moyennes environ de 0,55g et les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 500°C, concentration 8%,durée 5h avaient les poids frais les plus faibles avec moyennes environ de 0,08g ,et pour le poids frais de témoin est plus faible avec moyennes environ de 0,15g (Figure n°11).

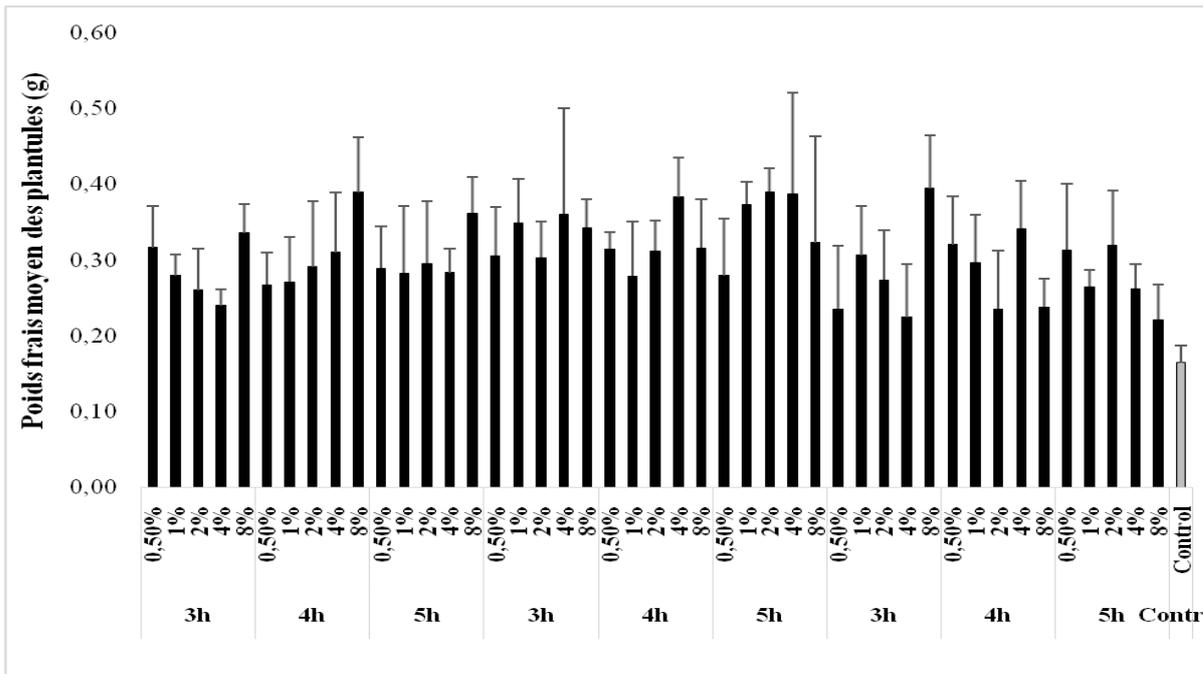


Figure N° 11: Poids frais moyen des plantules (g) ; eau gélosé orge

➤ **Poids sec moyen des plantules (g)**

En analysant le graphique, on peut observer l'effet de la température et de la durée de carbonisation du macérat de biochar sur la croissance des plantules d'orge, le graphique montre que la concentration de biochar, la température et la durée de carbonisation du biochar ont un effet significatif sur le poids sec moyen des plantules d'orge après germination. Les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 500°C, concentration 1%, durée 4h avaient les poids secs plus importants avec moyennes environ de 0,18g et les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 400°C, concentration 0,5%, durée 3h avaient les poids secs les plus faibles avec moyennes environ de 0,08g et pour le contrôle le poids sec est très faible que les poids de plantes expérimentales (Figure n°12).

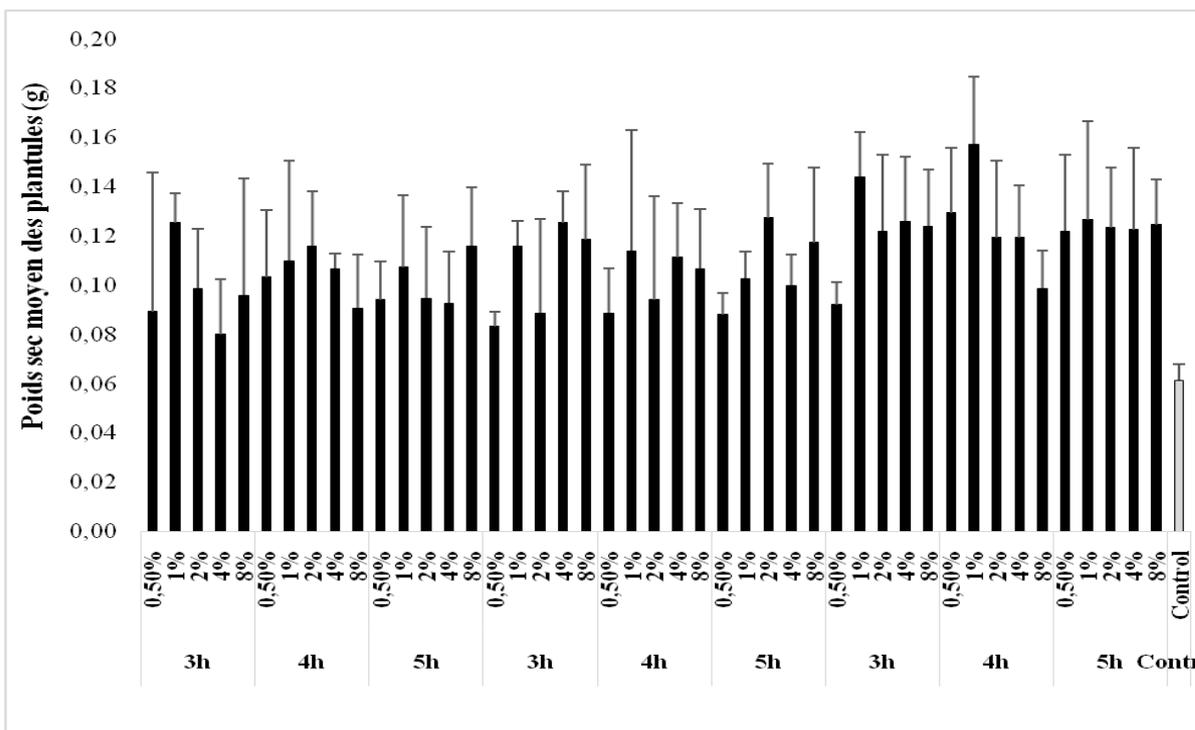


Figure N° 12: Poids sec moyens des plantules (g) ; eau gélifiée orge

II.1.1.2. Germination eau gélifiée laitue

➤ Germination eau gélifiée après 20h

Le pourcentage de germination de laitue augmente avec la concentration de biochar, pour toutes les températures de carbonisation. Le pourcentage de germination de laitue est **systematiquement** plus élevé pour les températures de carbonisation les plus élevées (400°C et 500°C), pour toutes les concentrations de biochar avec du biochar qu'en l'absence de biochar (groupe témoin).

Le graphe montre que la concentration de biochar et la température de carbonisation ont un effet positif sur le pourcentage de germination de laitue eau gélifiée (gélifiée de macérat de biochar) après 20 heures d'incubation. La durée de carbonisation n'a pas d'effet significatif sur le pourcentage de germination (Figure n°13).

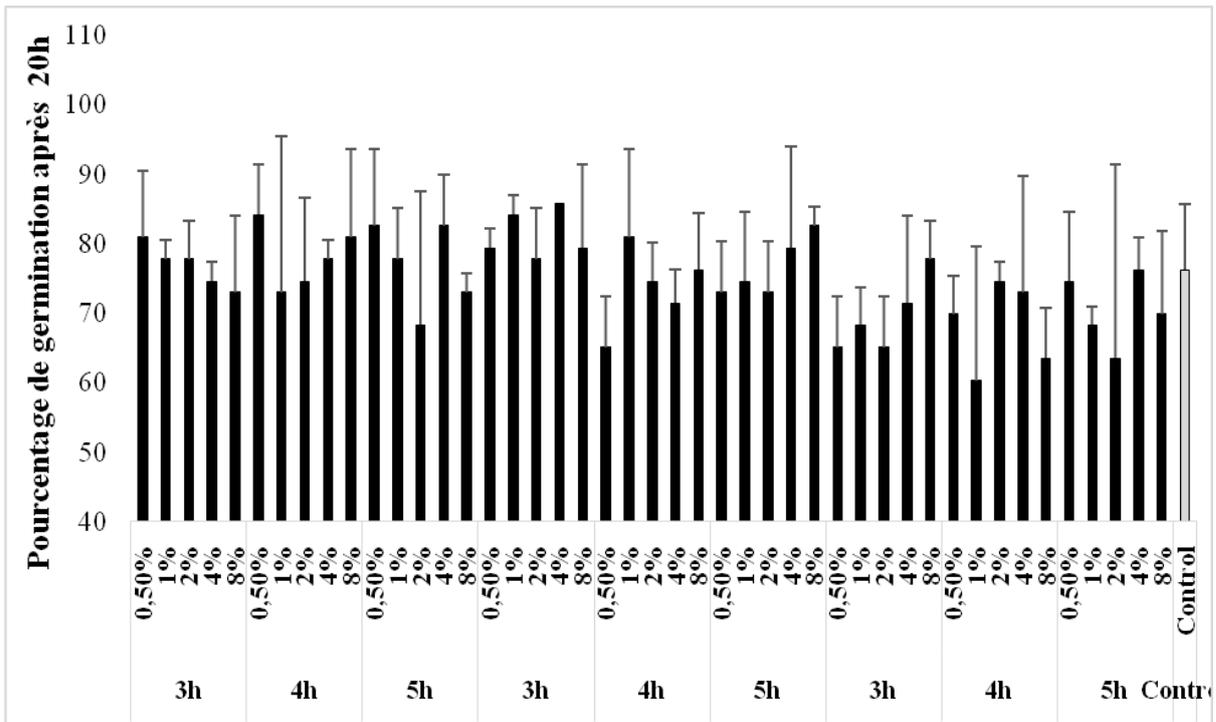


Figure N° 13: pourcentage de germination de laitue après 20h ; eau gélosée

➤ Germination de laitue après 44h eau gélosé

Le pourcentage de germination de la laitue augmente généralement avec l'augmentation de la concentration en biochar et de la température de carbonisation, jusqu'à un certain point. La durée de carbonisation ne semble pas avoir d'effet significatif sur le taux de germination.

Le taux de germination le plus élevé (110 %) a été obtenu avec une concentration en biochar de 2 %, une température de carbonisation de 300°C et une durée de carbonisation de 3 heures

Le taux de germination de la laitue dans le groupe témoin était de 50 %. Dans l'ensemble, le graphique suggère que le biochar peut être utilisé pour améliorer le taux de germination de la laitue. La concentration optimale en biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation pour une application particulière dépendront des conditions spécifiques (figure n°14).

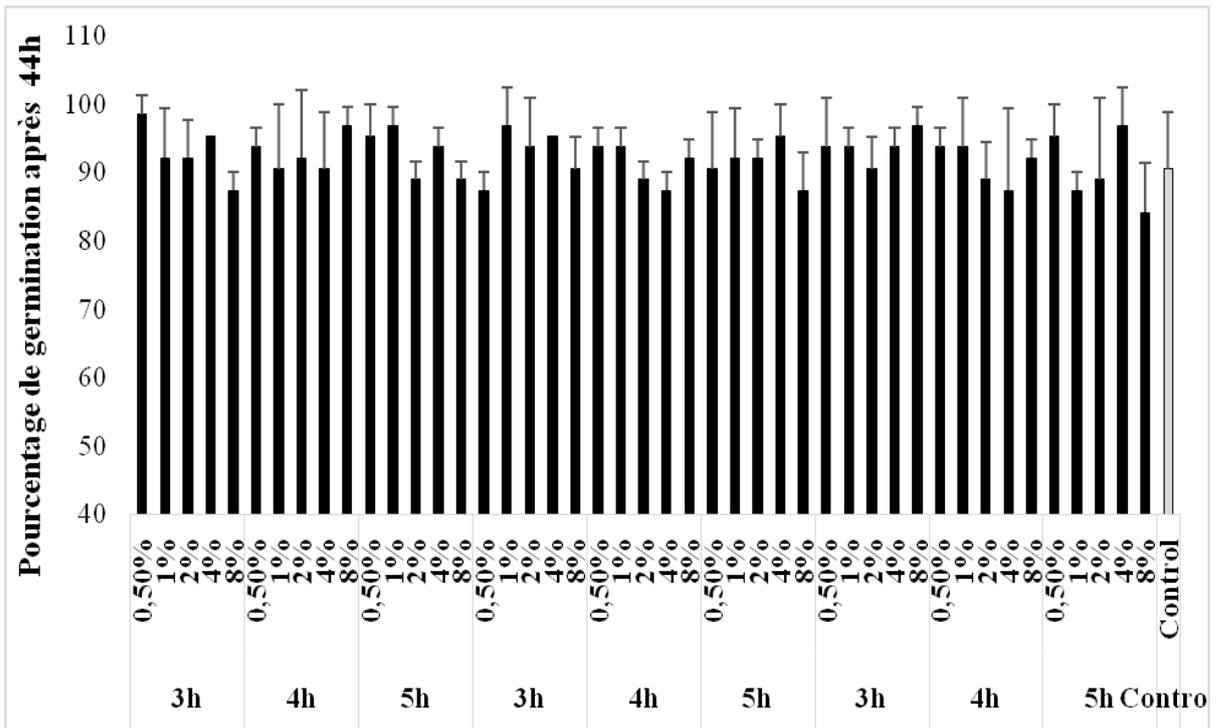


Figure N° 14: Pourcentage de germination de laitue après 44h ; eau gélifiée

➤ Germination de laitue après 68h eau gélifiée

Le graphique montre que la concentration de biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation ont toutes un effet significatif sur la germination de la laitue, le biochar peut être un amendement bénéfique pour la germination de la laitue, La différence de germination entre le groupe de contrôle et les groupes traités au biochar n'est pas statistiquement significative.

L'effet du biochar dépend de la concentration, de la température de carbonisation et de la durée de carbonisation. Les résultats suggèrent que la meilleure combinaison de ces variables pour maximiser la germination est une concentration de biochar de 2 %, une température de carbonisation de 400°C et une durée de carbonisation de 5 h (Figure n°15).

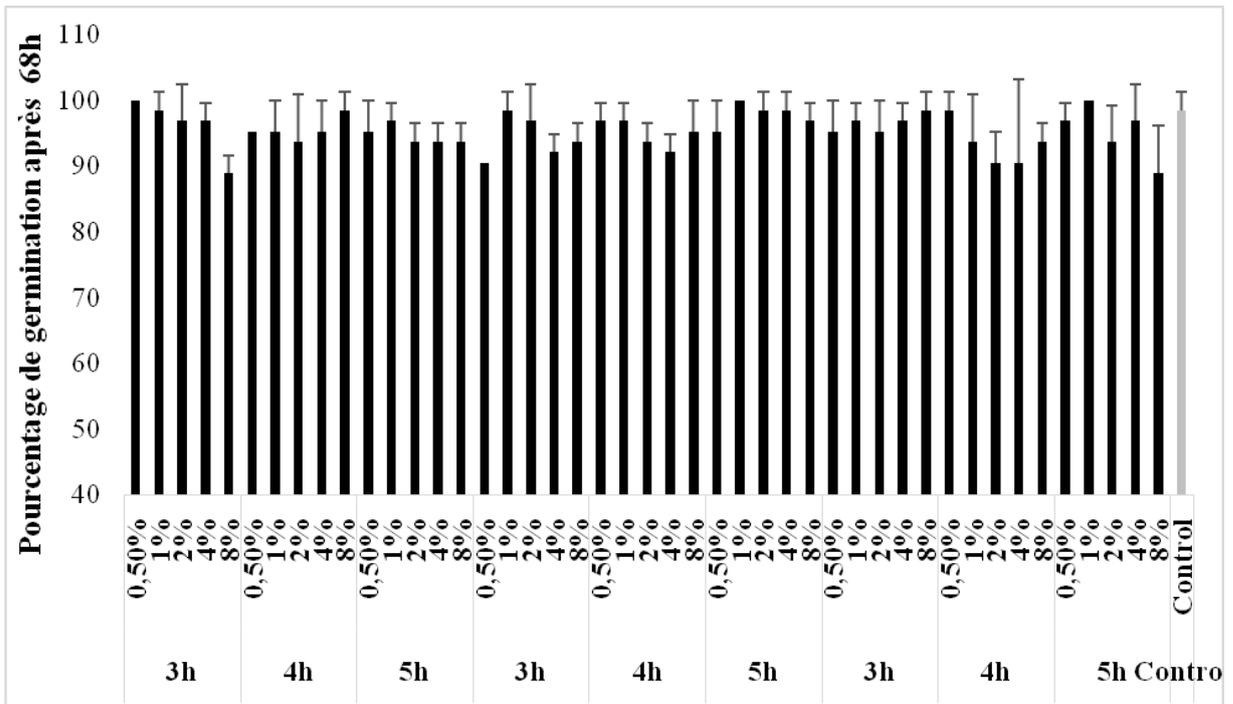


Figure N° 15: Pourcentage de germination de laitue après 68h ; eau gélifiée

➤ Poids frais moyen des plantes

Le graphique montre que la concentration de biochar, la température et la durée de carbonisation du biochar ont un effet significatif sur le poids frais moyen des plantules de laitue après germination.

Le poids frais moyens augmente à températures 300°C et 400°C par rapport la température 500°C, les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 500°C, concentration 8%, durée 4h avaient les poids frais plus importants avec moyennes environ de 0,14g et les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 500°C, concentration 1%, durée 5h avaient les poids frais les plus faibles avec moyennes environ de 0,04g et pour le contrôle le poids frais est très faible que les poids de plantes expérimentales (Figure n°16).

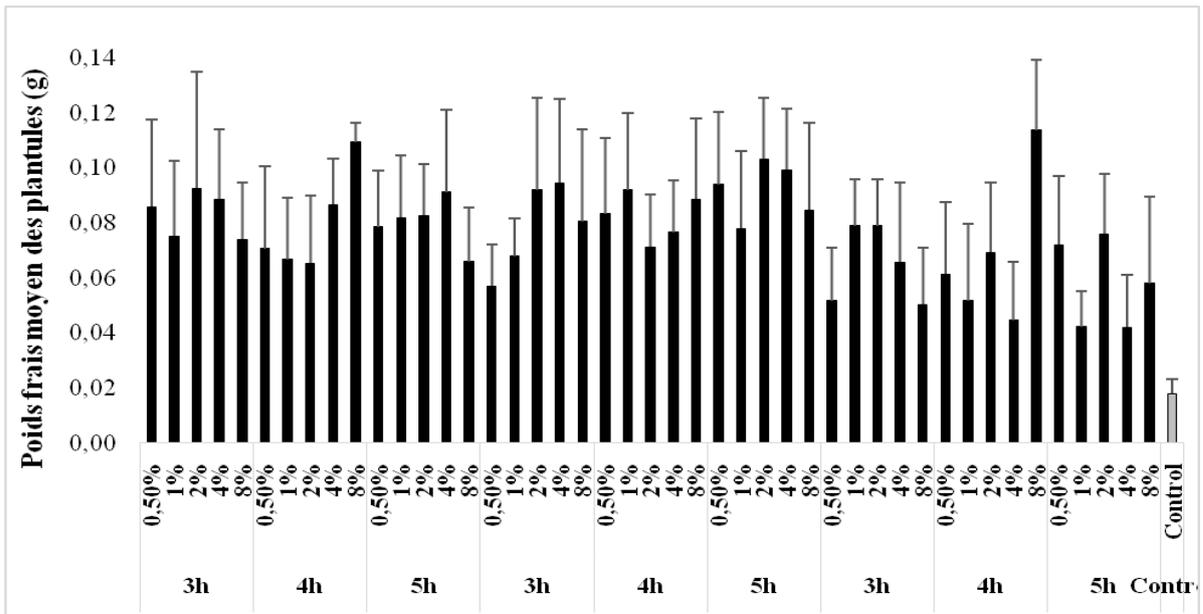


Figure N° 16: poids frais moyen des plantules (g) ; eau gélosé laitue

➤ **Poids sec moyen des plantes**

Le graphique montre l'effet de la concentration de biochar, de la température et de la durée de carbonisation du biochar sur le poids sec moyen des plantules de laitue après germination.

Les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 300°C, concentration 2%, durée 3h avaient les poids secs plus importants avec moyennes environ de 0,11g et les plantes qui ont été germées sur le milieu de macérat à température 400°C, concentration 1%, durée 5h avaient les poids secs les plus faibles avec moyennes environ de 0,02g et pour le contrôle le poids sec est très faible que les poids de plantes expérimentales avec moyenne environ de 0,001g (Figure n°17).

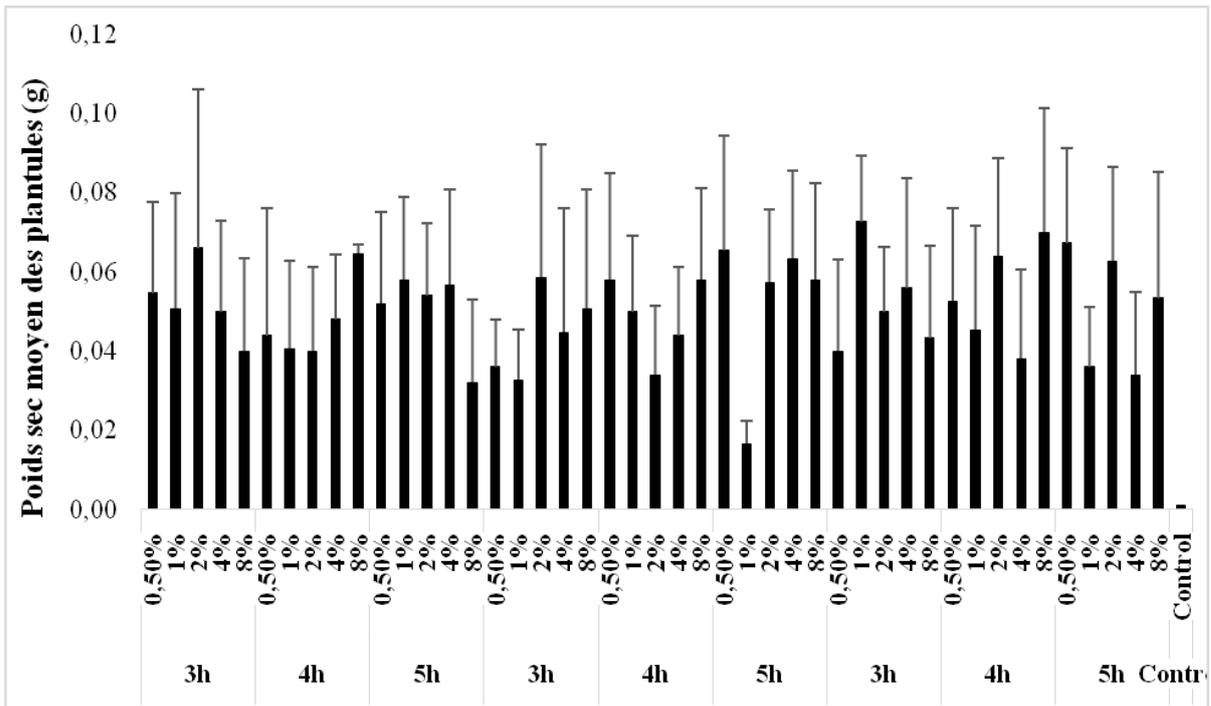


Figure N° 17: Poids sec moyen des plantules (g) ; eau gélifiée laitue

II.1.1.3. Germination des plantes sable (orge)

➤ Germination Après 44h d'incubation

Les résultats suggèrent que Le pourcentage de germination de l'orge augmente généralement avec la concentration de biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation. L'effet de la concentration de biochar est le plus important à basse température de carbonisation (300°C). L'effet de la température de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar (0,5%) et l'effet de la durée de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar et à basse température de carbonisation. Le biochar peut améliorer la germination de l'orge sur sable. La ligne grise montre que le pourcentage de germination de l'orge dans le groupe de contrôle est généralement inférieur au pourcentage de germination de l'orge dans les groupes traités au biochar. Cela suggère que le biochar a un effet positif sur la germination de l'orge (Figure n°18).

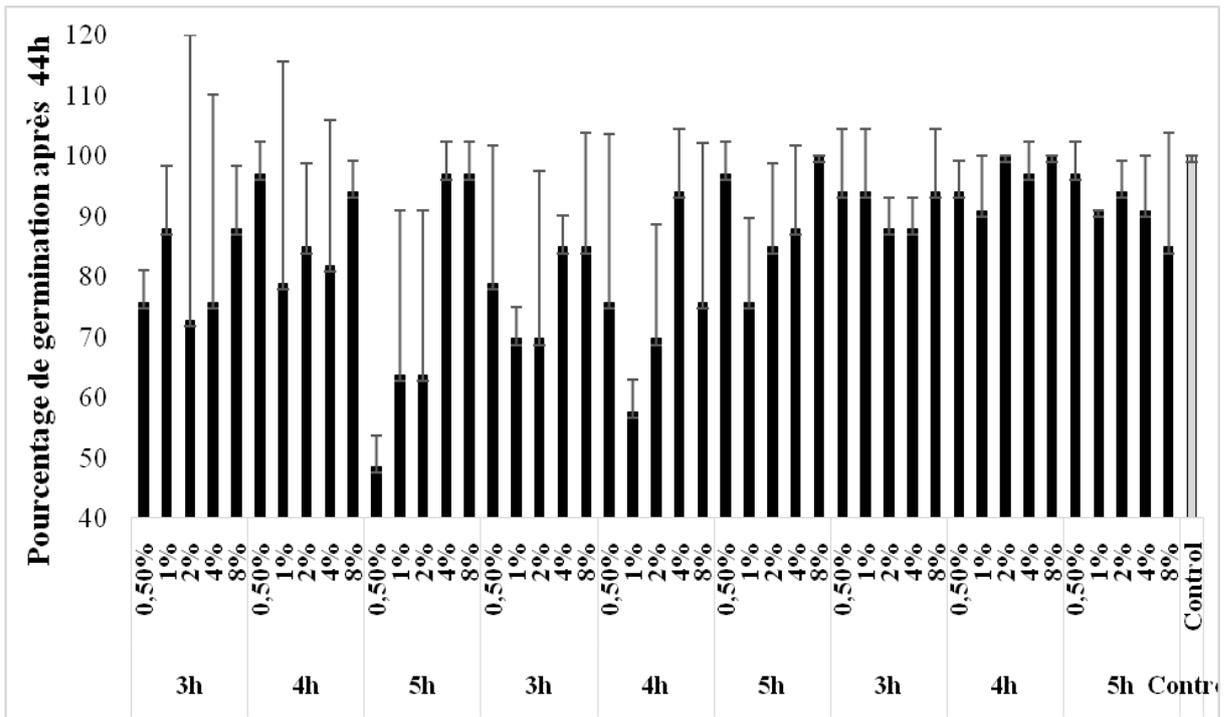


Figure N° 18: Pourcentage de germination après 44h ; sable (orge)

➤ Germination Après 68h

Dans cet histogramme les résultats montrent que le pourcentage de germination de l'orge augmente généralement avec la concentration de biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation.

L'effet de la concentration de biochar est le plus important à basse température de carbonisation (300°C). L'effet de la température de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar (0,5%).

L'effet de la durée de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar et à basse température de carbonisation.

Le pourcentage de germination de l'orge dans le groupe de contrôle est généralement inférieur au pourcentage de germination de l'orge dans les groupes traités au biochar donc le biochar a un effet positif pour améliorer la germination dans le sable (Figure n°19).

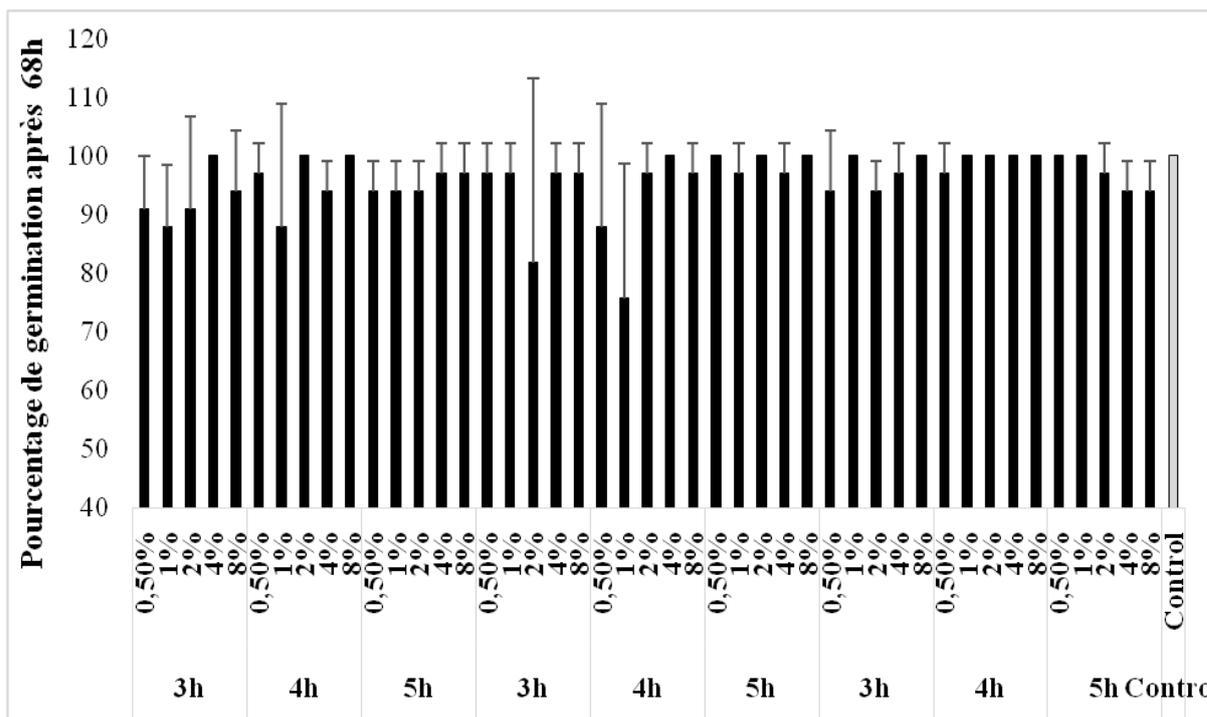


Figure N° 19: Pourcentage de germination après 68h ; sable (orge).

➤ Germination Après 92h :

Cet histogramme montre que le pourcentage de germination de l'orge augmente généralement avec la concentration de biochar, la température de carbonisation et la durée de carbonisation c'est-à-dire le même effet qui influence après 44h et 68h.

L'effet de la concentration de biochar est le plus important à basse température de carbonisation (300°C). L'effet de la température de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar (0,5%).

L'effet de la durée de carbonisation est le plus important à faible concentration de biochar et à basse température de carbonisation.

Le pourcentage de germination de l'orge dans le groupe de contrôle est généralement inférieur au pourcentage de germination de l'orge dans les groupes traités au biochar donc le biochar a un effet positif pour améliorer la germination dans le sable (Figure n°20).

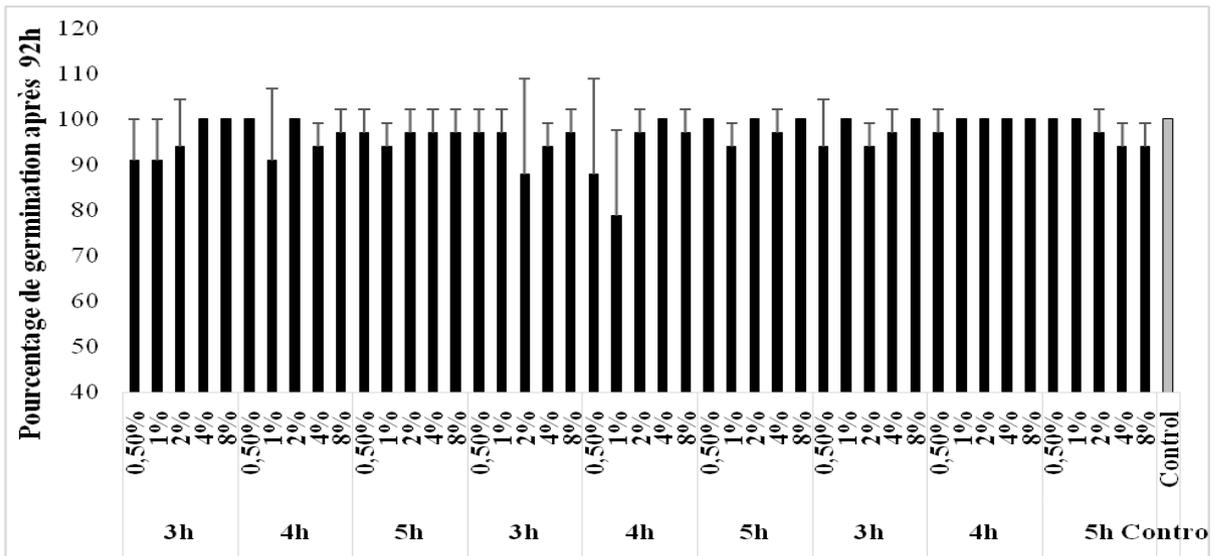


Figure N° 20: pourcentage de germination après 92h ; sable (orge).

➤ Poids frais de plantule orge sable

Le graphique montre que la concentration de biochar, la température et la durée de carbonisation du biochar ont un effet significatif sur le poids frais moyen des plantules d’orge après germination.

Les plantes qui ont été germées à température 400°C, concentration 2%, durée 4h avaient les poids frais plus importants avec moyennes environ de 0,40g et les plantes qui ont été germées à température 500°C, concentration 0,5%, durée 4h avaient les poids frais les plus faibles avec moyennes environ de 0,20g et pour le contrôle le poids frais est très faible que les poids de plantes expérimentales avec moyennes environ de 0,10g (Figure n°21).

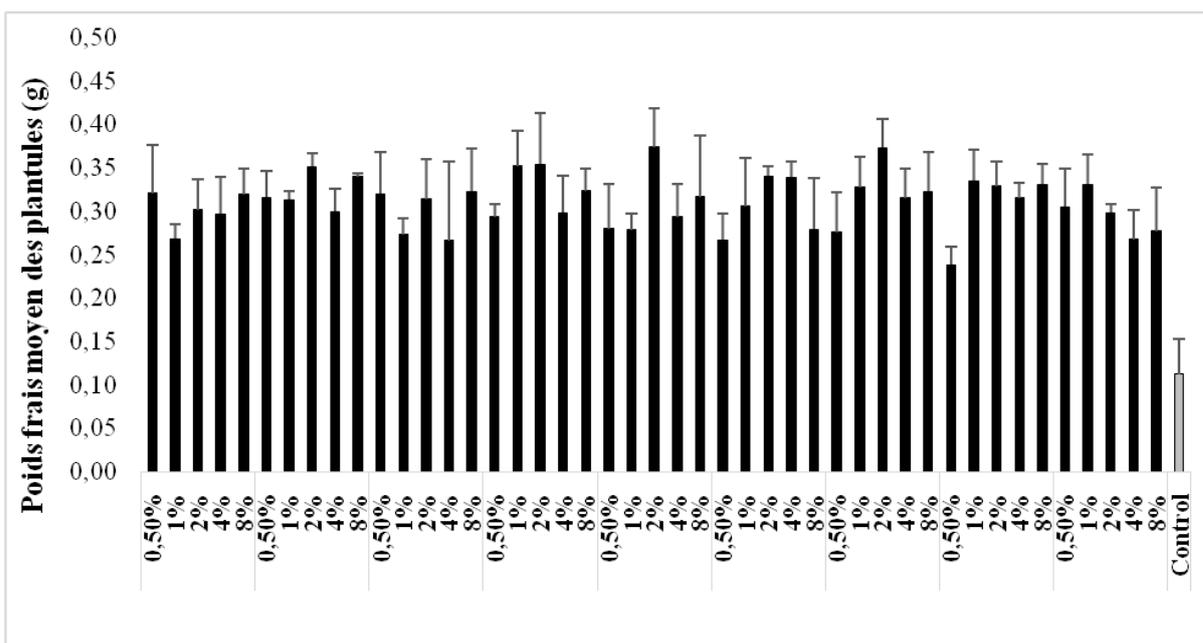


Figure N° 21: Poids frais moyen des plantules d’orge sable

➤ Poids sec moyen des plantules d'orge sable

Le graphique montre l'effet de la concentration de biochar, de la température et de la durée de carbonisation du biochar sur le poids sec moyen des plantules de laitue après germination.

Les plantes qui ont été germées à température 500°C, concentration 8%, durée 4h avaient les poids secs plus importants avec moyennes environ de 0,18g et les plantes qui ont été germées à température 300°C, concentration 4%, durée 3h avaient les poids secs les plus faibles avec moyennes environ de 0,07g et pour le contrôle le poids sec est très faible que les poids de plantes expérimentales avec moyenne environ de 0,04g (Figure n°22).

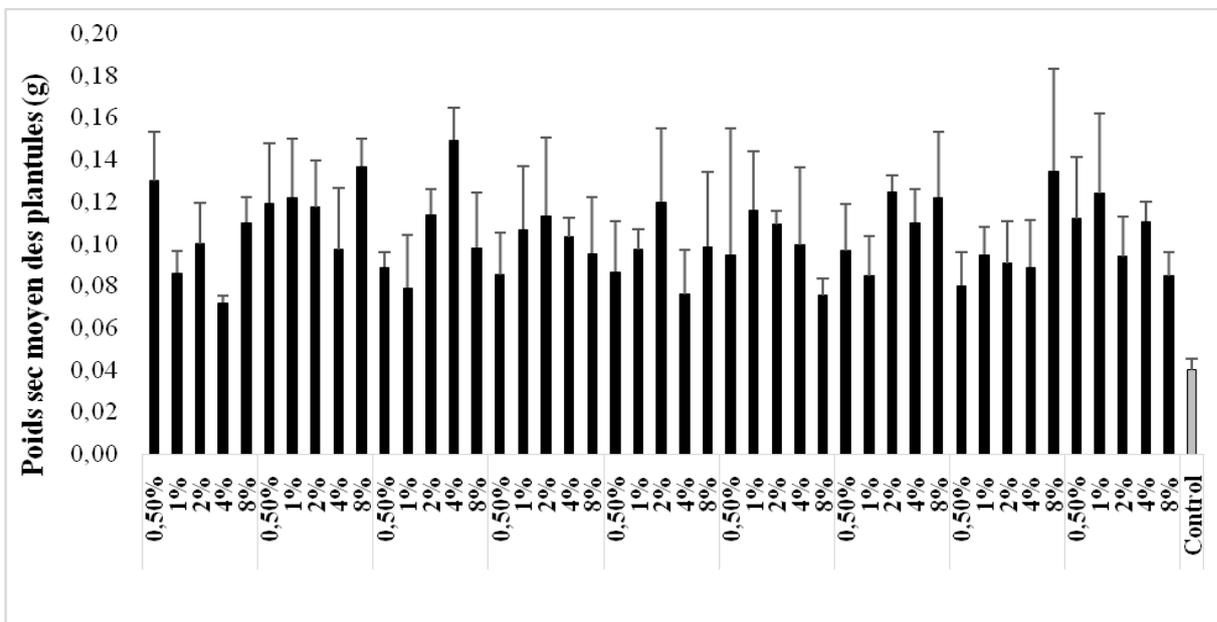


Figure N° 22: Poids sec moyen des plantules orge sable

II.1.1.4. Germination laitue sable

➤ Germination Après 44h

Le graphique montre que la concentration de biochar et la température de carbonisation ont un effet significatif sur le pourcentage de germination de la laitue.

En général, le pourcentage de germination augmente avec la concentration de biochar, jusqu'à un maximum de 4% et la température de carbonisation a également un effet positif sur la germination, mais l'effet est moins prononcé que celui de la concentration de biochar.

La combinaison optimale de concentration de biochar et de température de carbonisation semble être de 4% et 400°C, respectivement. Le biochar semble favoriser la germination de la laitue par rapport à un groupe témoin supposé (Figure n°23).

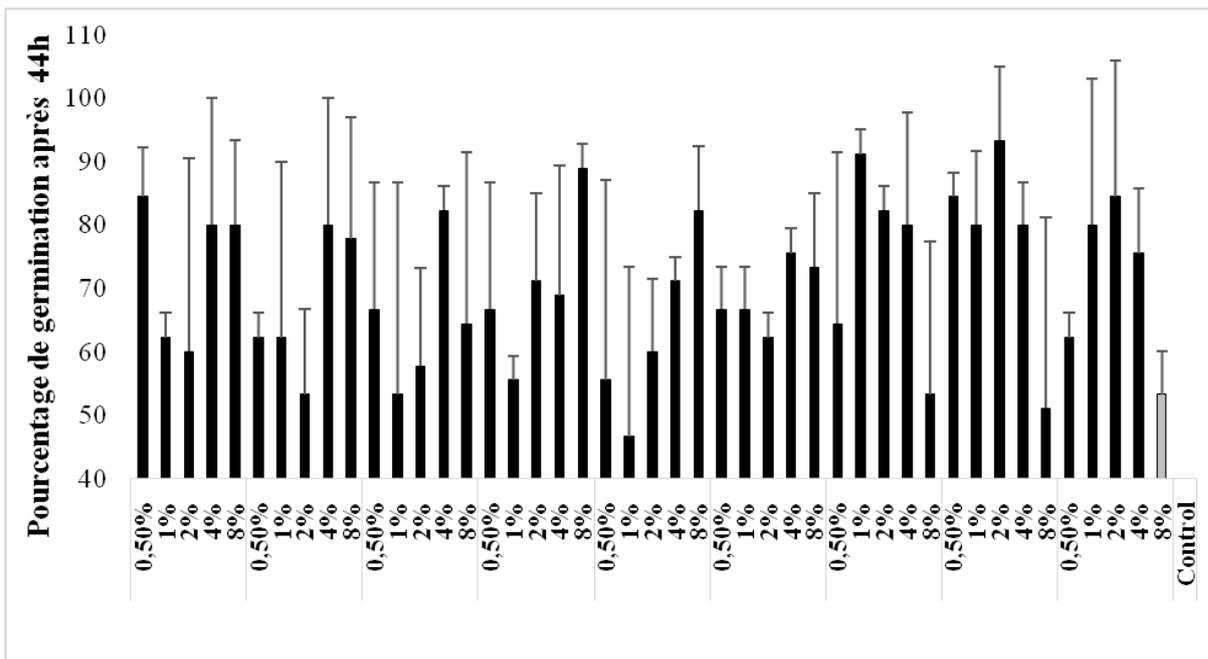


Figure N° 23: Pourcentage de germination après 44h sable (laitue).

➤ Germination Après 68

Le graphique montre que la concentration de biochar et la température de carbonisation ont un effet significatif sur le pourcentage de germination de la laitue.

La température de carbonisation a également un effet positif sur la germination, mais l'effet est moins prononcé que celui de la concentration de biochar. La combinaison optimale de concentration de biochar et de température de carbonisation semble être de 4% et 400°C, respectivement. Pour toutes les températures de carbonisation, le pourcentage de germination est supérieur avec du biochar qu'en l'absence de biochar.

L'effet le plus important du biochar est observé à la température de carbonisation de 400°C, où le biochar à 4% de concentration augmente le pourcentage de germination de plus de 20% par rapport au témoin (Figure n°24).

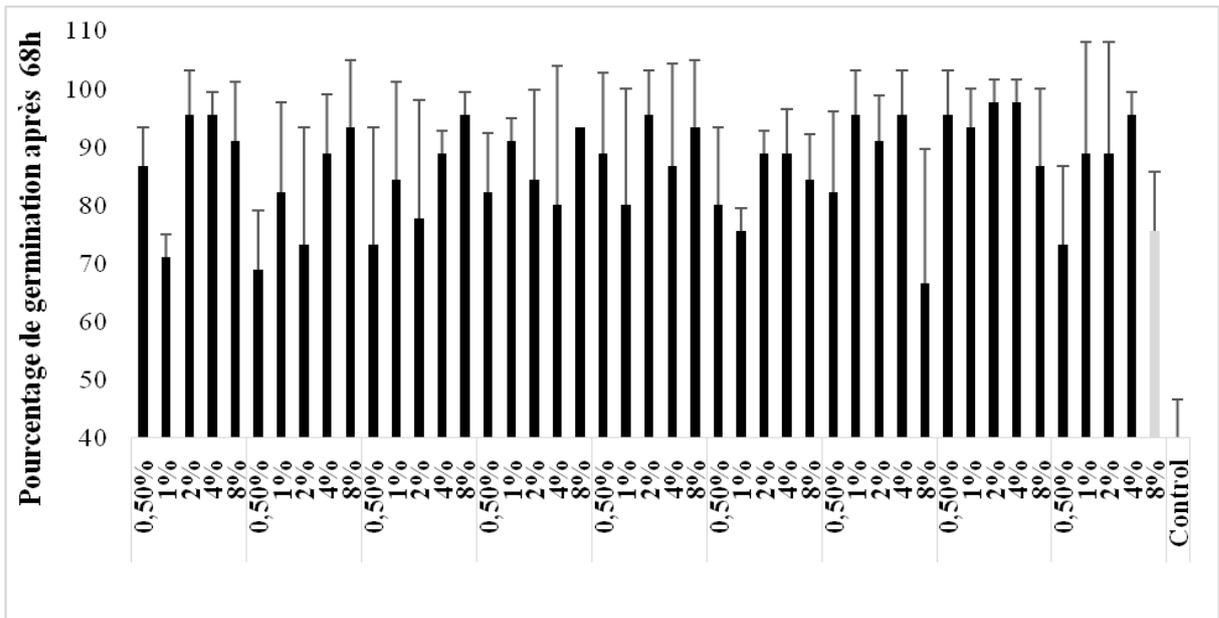


Figure N° 24: Pourcentage de germination après 68h sable (laitue).

➤ Germination Après 92h

Cet histogramme montre la même observation sur l'effet de biochar sur la germination de laitue, on observe une évolution de germination par rapport les résultats de 44h et 68h.

Le biochar peut améliorer considérablement la germination de la laitue sur sable. La concentration optimale de biochar est de 4% et la température de carbonisation optimale est de 400°C. Ces résultats suggèrent que le biochar pourrait être un amendement utile pour l'agriculture, en particulier pour la culture de la laitue. L'effet le plus important du biochar est observé à la température de carbonisation de 400°C, où le biochar à 4% de concentration augmente le pourcentage de germination de plus de 30% par rapport au témoin (Figure n°25).

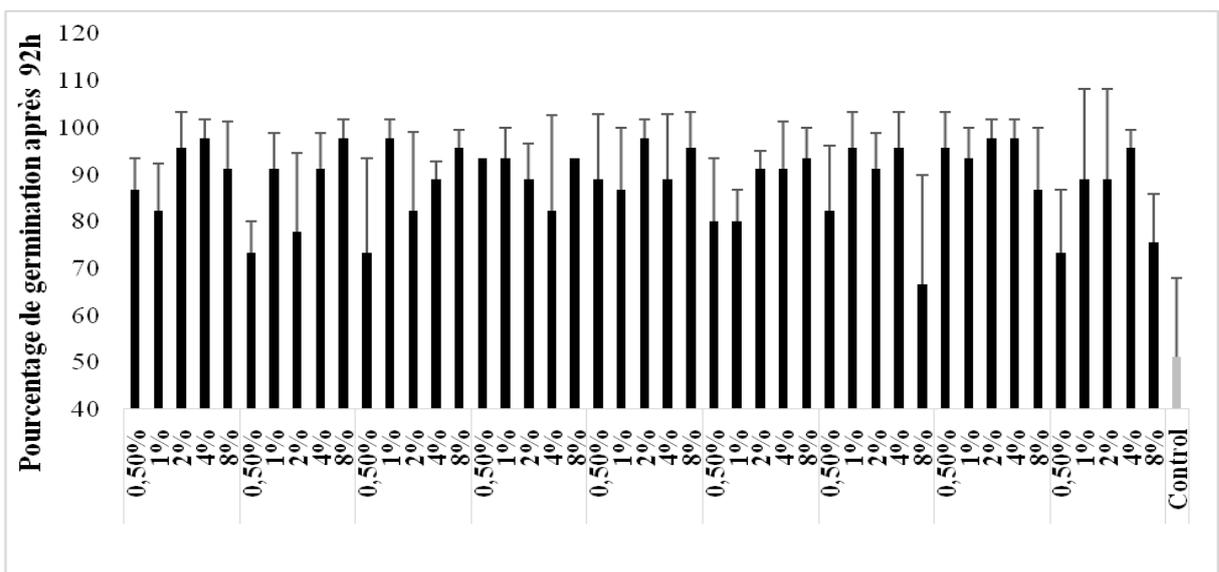


Figure N° 25: pourcentage de germination après 92h sable laitue.

➤ Poids frais moyen des plantules (g) sable

Le graphique montre que la concentration de biochar, la température et la durée de carbonisation du biochar ont un effet significatif sur le poids frais moyen des plantules de laitue après germination.

Le poids frais moyens augmente à concentration 8% que les autres concentrations , les plantes qui ont été germées à température 400C° ,concentration 8%,durée 4h avaient les poids frais plus importants avec moyennes environ de 0,35g et les plantes qui ont été germées à température 300C°,concentration0,5%,durée 5h avaient les poids frais les plus faibles avec moyennes environ de 0,06g et pour le contrôle le poids frais est très faible que les poids de plantes expérimentales avec moyennes environ de 0,02 (Figure n°26).

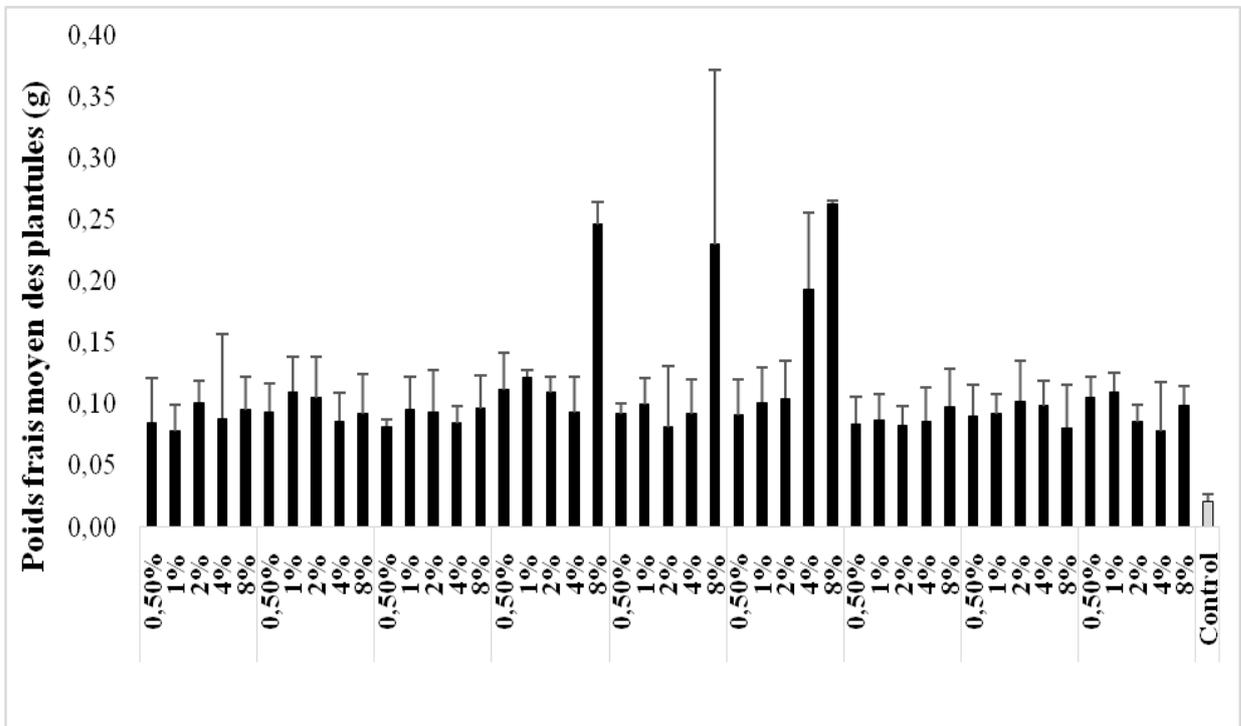


Figure N° 26: Poids frais moyen des plantules (g) sable laitue

➤ Poids sec moyen des plantules (g) sable laitue

Le graphique montre l'effet de la concentration de biochar, de la température et de la durée de carbonisation du biochar sur le poids sec moyen des plantules de laitue après germination.

Les plantes qui ont été germées à température 400°C, concentration 4%, durée 5h avaient les poids secs plus importants avec moyennes environ de 0,14g et les plantes qui ont été germées à température 400°C, concentration 0,5%,durée 4h avaient les poids secs les plus

faibles avec moyennes environ de 0,04g et pour le contrôle le poids sec est très faible que les poids de plantes expérimentales avec moyenne environ de 0,001g (Figure n°27).

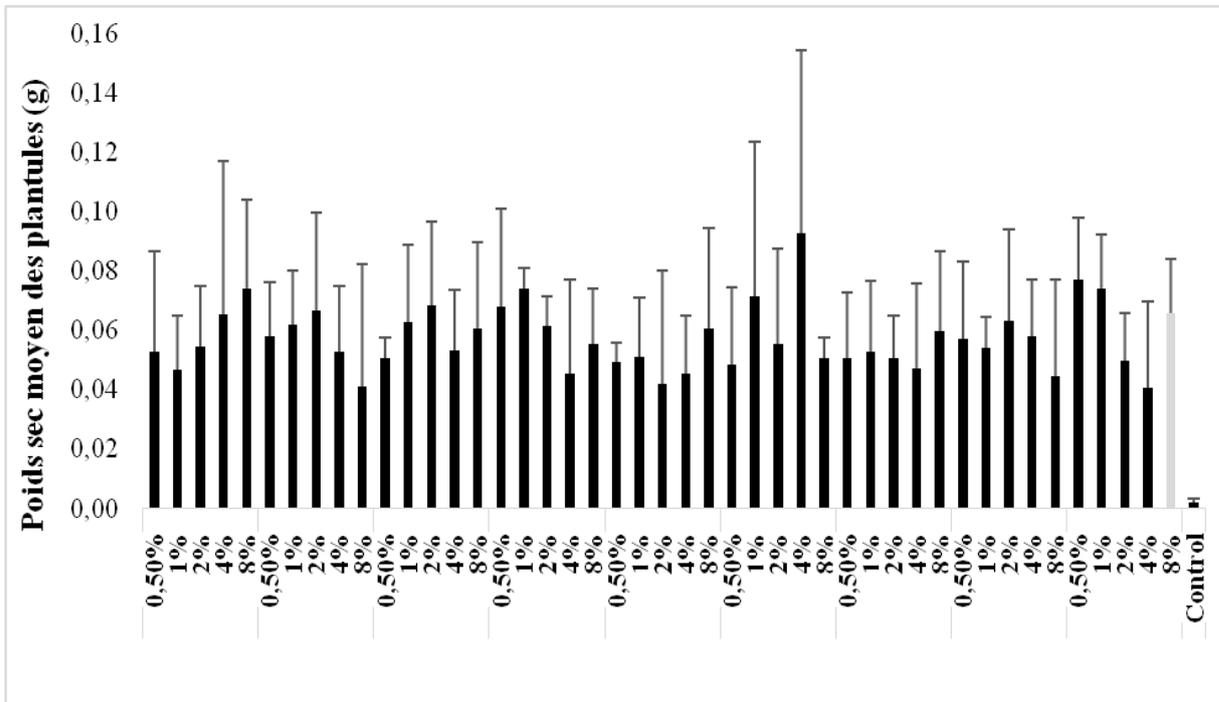


Figure N° 27: Poids sec moyen des plantules (g) sable laitue.

II.1.1.5. Croissance sur eau gélifiée plus sable (orge)

- Croissance eau gélifiée
 - Longueur des racines au j3

Le graphique présenté illustre la longueur des racines d'orge après 3 jours de germination dans différents milieux gélifiés contenant du biochar à des concentrations et des températures de carbonisation variables.

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à des températures élevées (400,500) peut avoir un effet positif sur la croissance où les racines d'orge atteignent une longueur moyenne de plus de 20 mm dans certaines conditions. La concentration de biochar semble avoir un effet moins important sur la longueur des racines que la température de carbonisation. La longueur des racines des plantules du groupe "contrôle" est généralement la plus courte de toutes les conditions testées. Cela suggère que le biochar a un effet positif sur la croissance des racines d'orge, par rapport à l'absence de biochar. Figure n°28

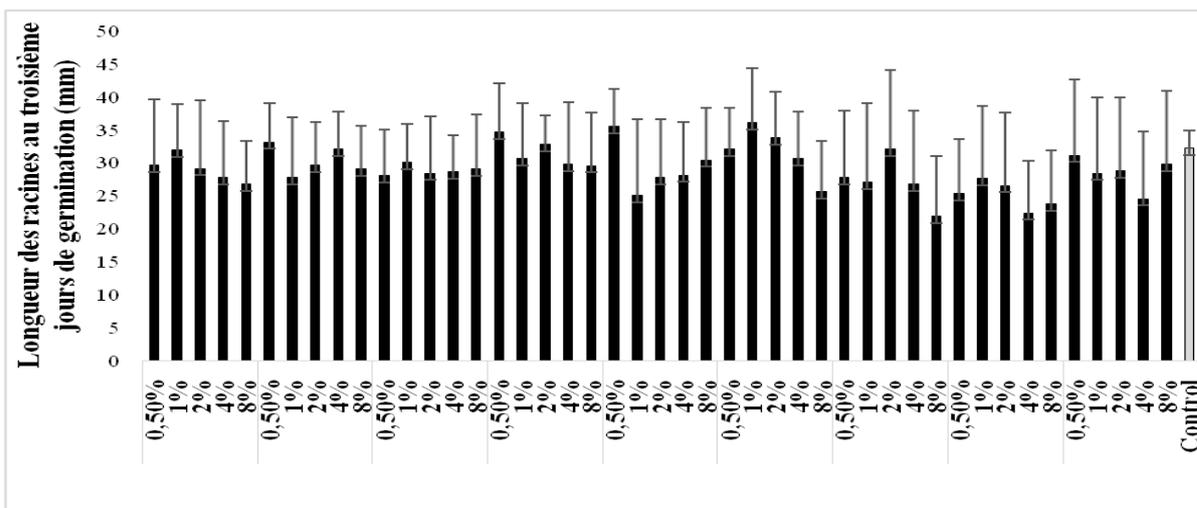


Figure N° 28: longueur des racines au j3 de germination (orge)

▪ **Longueur des racines au j8 :**

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à des températures plus élevées (400°C et 500°C) peut avoir un effet positif sur les racines d'orge qui ont tendance à être plus longues après 8 jours de germination et pour la concentration de biochar semble avoir un effet moins important sur la longueur des racines que la température de carbonisation.

Les résultats les plus remarquables sont observés pour le biochar carbonisé à 500°C, où les racines d'orge atteignent une longueur moyenne de plus de 120 mm dans certaines conditions.

La longueur des racines des plantules du groupe "contrôle" est généralement la plus courte de toutes les conditions testées. En comparant les résultats à 8 jours de germination avec ceux à 3 jours de germination, on peut observer que la tendance générale est similaire. Les racines d'orge ont tendance à être plus longues dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures plus élevées (Figure n°29).

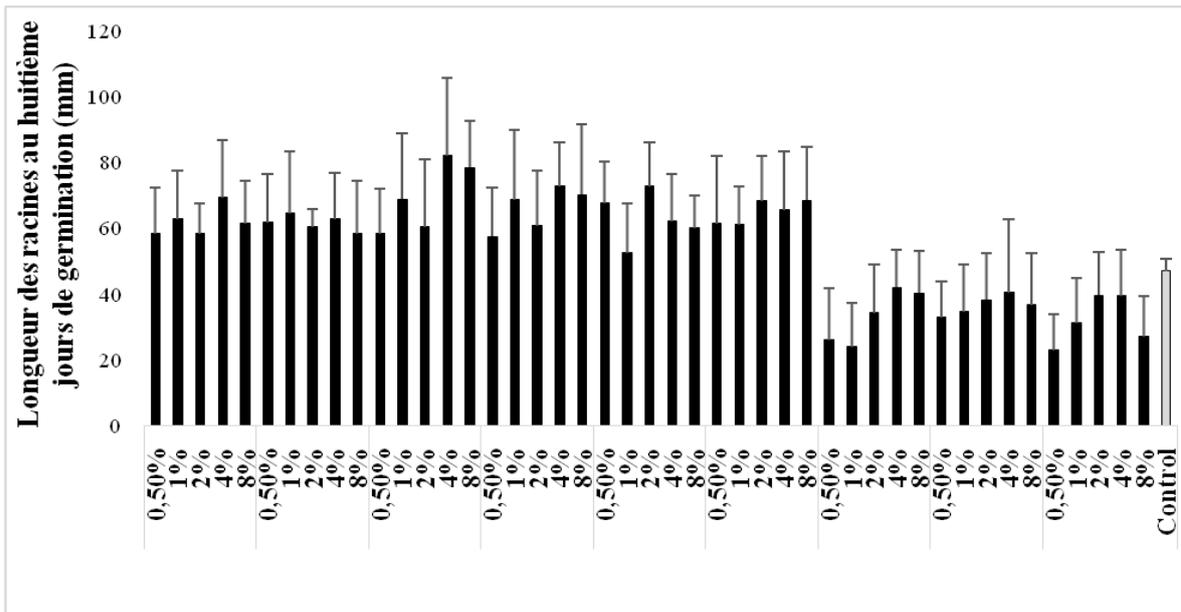


Figure N° 29: longueur des racines au j8 de germination (orge)

▪ Nombre des racines au j3

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à des températures élevées pourrait favoriser le développement racinaire de l'orge après 3 jours de germination. On observe un développement racinaire plus important dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures plus élevées (400°C et 500°C). L'effet de la concentration de biochar sur le nombre de racines semble moins prononcé que celui de la température de carbonisation.

Le nombre de racines des plantules du groupe "contrôle" est généralement le plus bas parmi toutes les conditions testées, cela suggère que le biochar a un effet positif sur le développement racinaire de l'orge, par rapport à l'absence de biochar (Figure n°30).

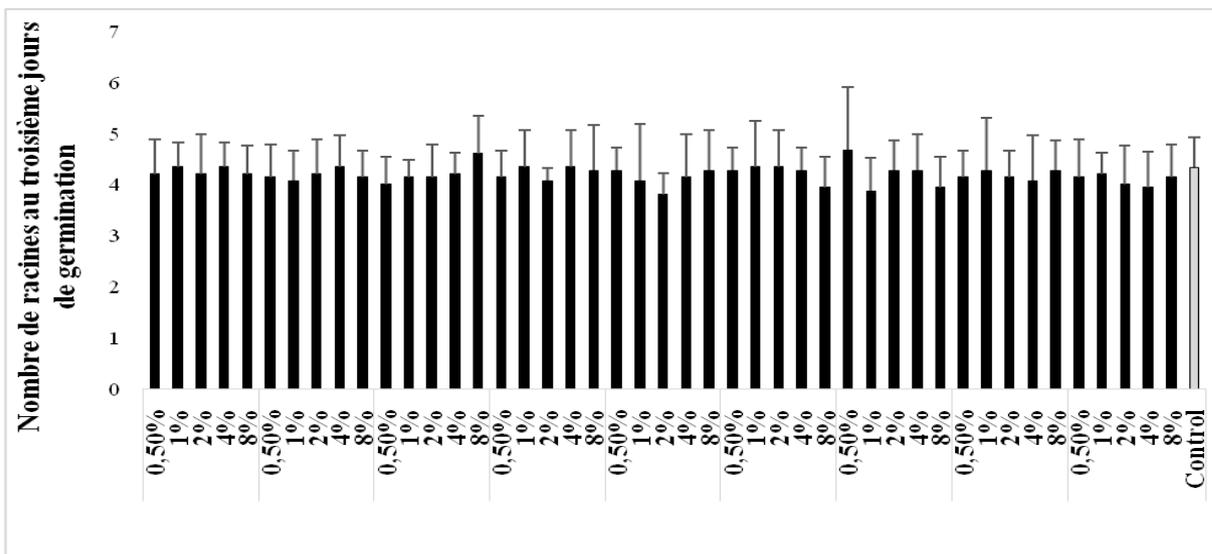


Figure N° 30: nombre de racines au j3 de germination (orge)

▪ **Nombre de racines au j8**

Les résultats indiquent que le nombre de racines d'orge augmente avec la durée de germination, cela s'explique par la croissance naturelle des racines au fil du temps.

L'effet du biochar sur le nombre de racines est plus prononcé après 8 jours de germination, ceci suggère que le biochar exerce son influence sur le développement racinaire sur une période plus longue.

L'effet positif du biochar carbonisé à des températures élevées (400°C et 500°C) sur le nombre de racines est observé à la fois après 3 et 8 jours de germination.

Après 8 jours de germination, l'effet positif du biochar sur le nombre de racines tend à s'accroître avec des concentrations plus élevées (4% et 8%). Le nombre de racines des plantules "contrôle" après 8 jours est plus élevé qu'après 3 jours, reflétant la croissance naturelle des racines au fil du temps. Cependant, il reste inférieur aux nombres de racines observés dans les groupes avec biochar, suggérant que le biochar favorise un développement racinaire plus important sur une période de 8 jours (Figure n°31).

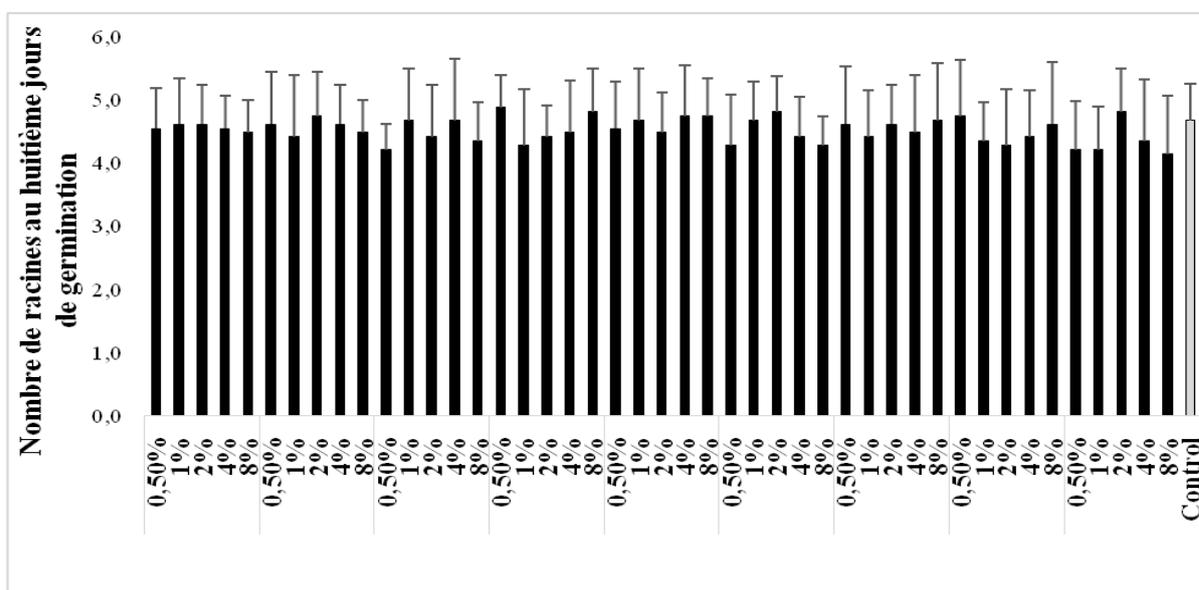


Figure N° 31: Nombre de racines au j8 de germination (orge)

▪ **Longueur de coléoptile au j3**

Les résultats indiquent que la longueur moyenne des coléoptiles d'orge est généralement plus élevée dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures plus élevées (400°C et 500°C).

L'effet de la concentration de biochar sur la longueur des coléoptiles semble être moins important que celui de la température de carbonisation.

La longueur des coléoptiles des plantules "contrôle" est généralement inférieure à celle des plantules cultivées dans des milieux contenant du biochar, suggérant que le biochar favorise une croissance plus importante des coléoptiles sur une période de 3 jours (Figure n°32).

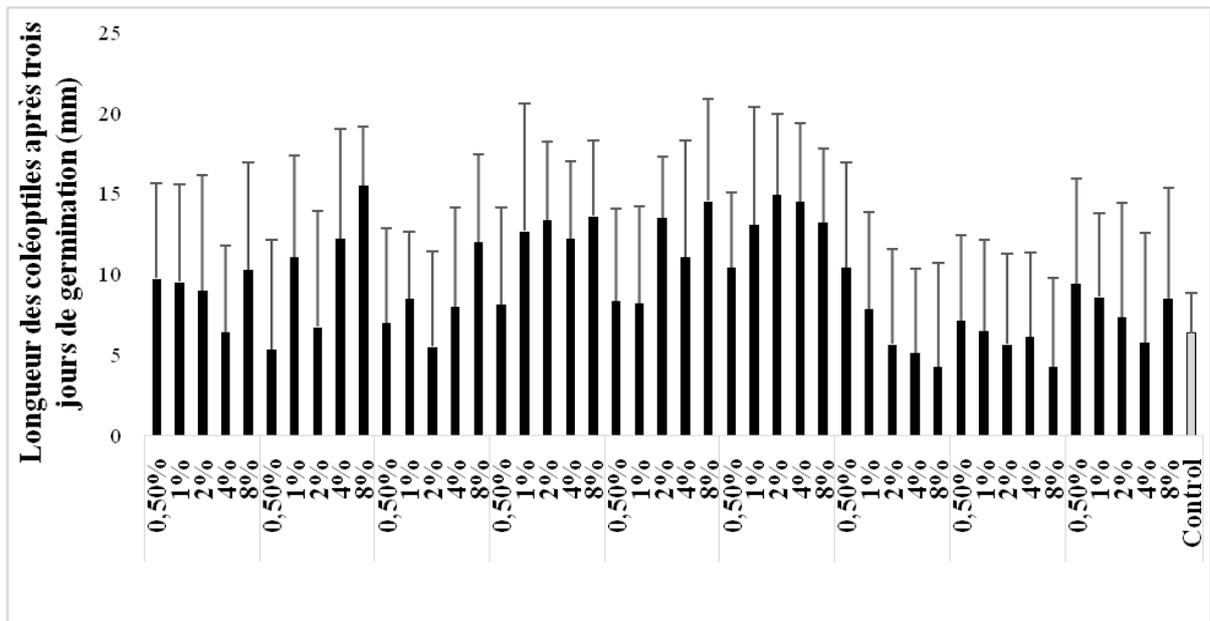


Figure N° 32: Longueur de coléoptile après j3 de germination (orge)

▪ Longueur de coléoptile après 8 jours

Les résultats indiquent que la longueur moyenne des coléoptiles d'orge est généralement plus élevée dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures plus élevées (400°C et 500°C).

L'effet de la concentration de biochar sur la longueur des coléoptiles semble être moins important que celui de la température de carbonisation, l'effet de la durée de carbonisation semble être moins important que celui de la température de carbonisation. L'effet du biochar sur la longueur des coléoptiles est plus prononcé après 8 jours de germination. Ceci suggère que le biochar exerce son influence sur la croissance des coléoptiles sur une période plus longue. La longueur des coléoptiles des plantules "contrôle" après 8 jours de germination est généralement plus longue qu'après 3 jours, reflétant la croissance naturelle des coléoptiles au fil du temps (Figure n°33).

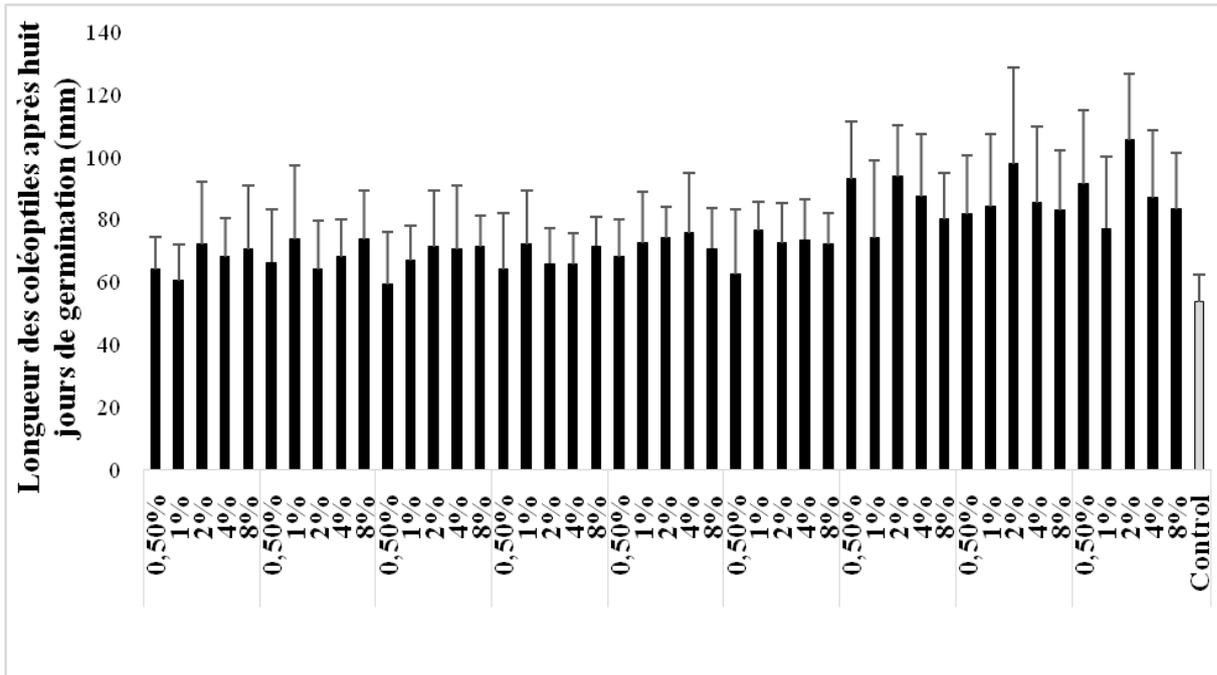


Figure N° 33: longueur des coléoptiles après 8 jours de germination (orge)

▪ **Longueur de la feuille après 8 jours :**

Les résultats indiquent que la longueur moyenne des feuilles d'orge est généralement plus élevée dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures plus élevées (400°C et 500°C).

L'effet de la concentration de biochar sur la longueur des feuilles semble être moins important que celui de la température de carbonisation.

Les résultats les plus remarquables sont observés pour le biochar carbonisé à 500°C, où la longueur moyenne des feuilles dépasse 70mm dans certaines conditions.

La longueur des feuilles des plantules "contrôle" après 8 jours de germination est généralement la plus courte parmi toutes les conditions testées, indiquant une croissance limitée des feuilles en l'absence de biochar (Figure n°34).

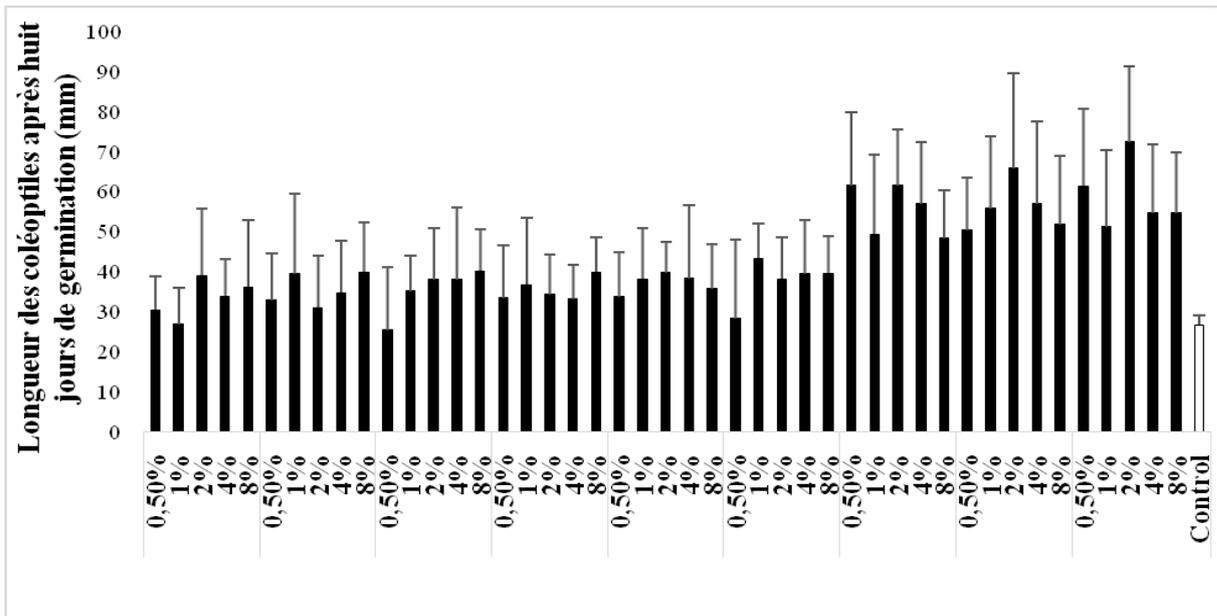


Figure N° 34: Longueur de feuille après huit jours de germination (orge)

➤ Croissance sable

▪ Longueur des racines au j3

La longueur des racines d'orge après 3 jours de germination dans 3 milieux sableux contenant du biochar à des concentrations de 0,5%, 1%, 2%, 4% et 8%. Le biochar a été carbonisé à des températures de 300°C, 400°C et 500°C pendant 3, 4 et 5 heures.

Les résultats indiquent que la longueur moyenne des racines d'orge est généralement plus élevée dans les milieux contenant du biochar carbonisé à des températures (400°C et 500°C).

L'effet de la concentration de biochar sur la longueur des racines semble être moins important que celui de la température de carbonisation.

Les résultats les plus remarquables sont observés pour le biochar carbonisé à 300°C et 500°C, où la longueur moyenne des racines dépasse 20 mm dans certaines conditions.

La longueur des racines des plantules "contrôle" après 3 jours de germination est généralement la plus courte parmi toutes les conditions testées, indiquant une croissance limitée des racines en l'absence de biochar (Figure n°35).

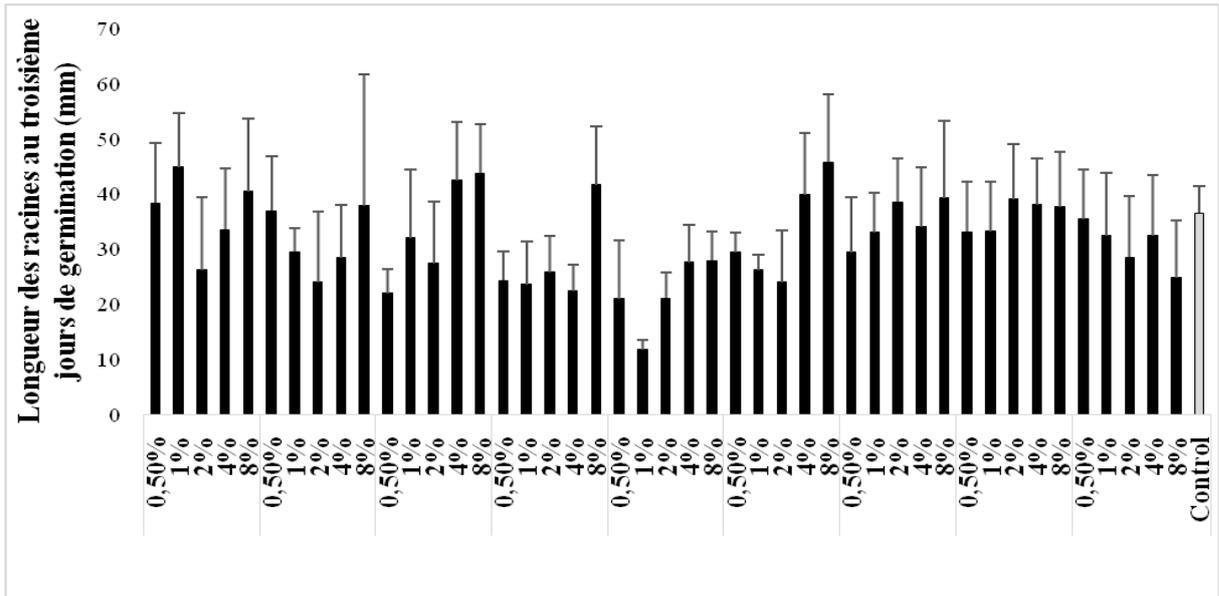


Figure N° 35: Longueur des racines au j3 de germination (orge)

▪ Longueur des racines au j8

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à les température (300°C et 500°C), en particulier à des concentrations plus élevées (4% et 8%), peut favoriser de manière significative la croissance des racines d'orge après 8 jours de germination, l'effet de la durée de carbonisation semble être moins important que celui de la température de carbonisation.

La longueur des racines des plantules "contrôle" est généralement inférieure à celle des plantules cultivées dans des milieux contenant du biochar, suggérant un effet positif du biochar sur la croissance des racines après 8 jours de germination (Figure n°36).

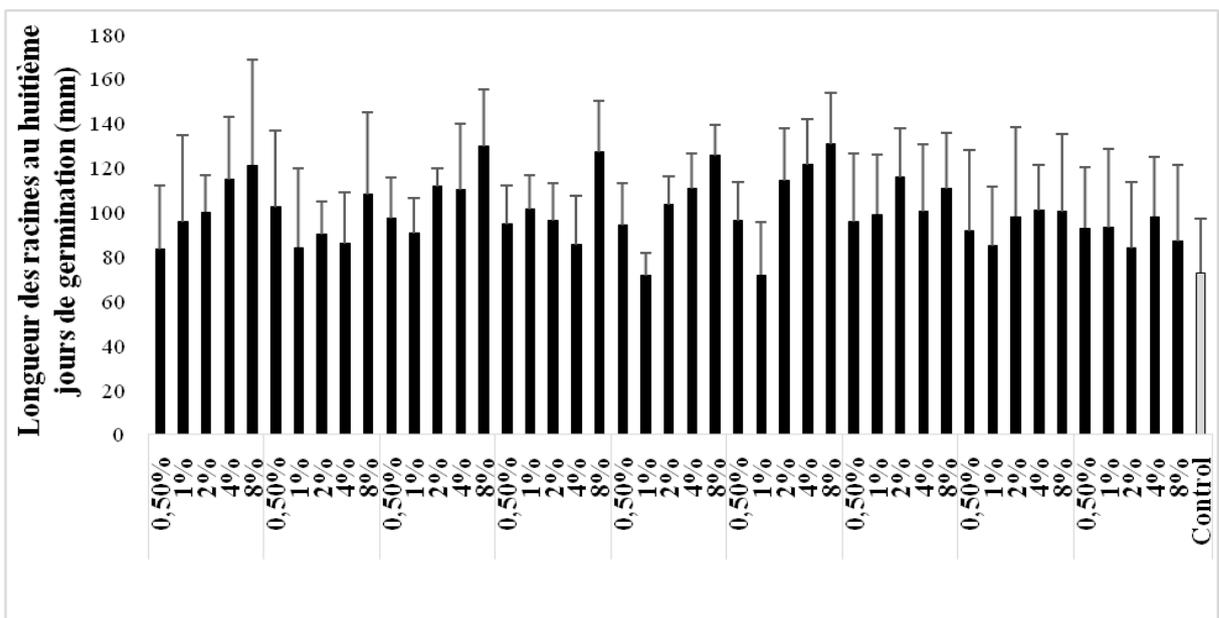


Figure N° 36: Longueur des racines au j8 de germination (orge)

▪ Nombre des racines au j 3

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à haute température (400°C et 500°C), en particulier à des concentrations de 1%, 2% et 4%, peut favoriser de manière significative le développement du système racinaire des plantules d'orge après 3 jours de germination où le nombre moyen de racines dépasse 8. L'effet de la durée de carbonisation semble être moins important que celui de la température de carbonisation. Le nombre de racines des plantules "contrôle" après 3 jours de germination est généralement le plus bas parmi toutes les conditions testées, indiquant un développement racinaire limité en l'absence de biochar (Figure n°37).

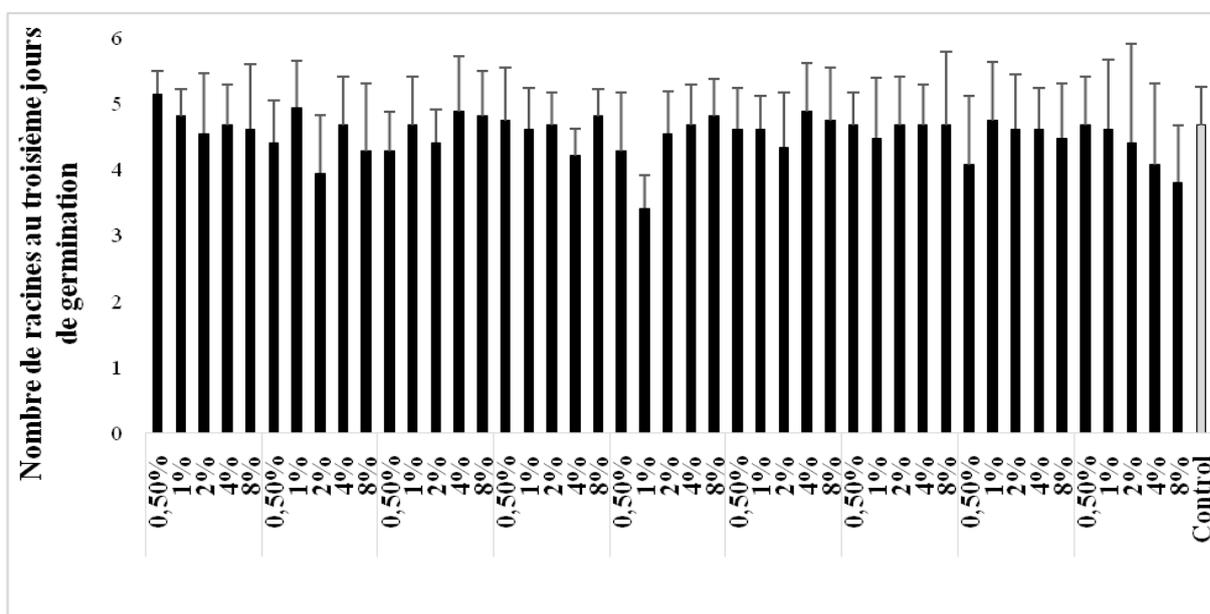


Figure N° 37: Nombre des racines au j3 de germination (orge)

▪ Nombre des racines au j8

On observe une tendance générale à l'augmentation du nombre de racines avec des températures de carbonisation plus élevées (400°C et 500°C), particulièrement pour les concentrations de biochar de 2%, 4% et 8%.

L'effet de la concentration de biochar sur le nombre de racines semble être plus important pour les températures de carbonisation élevées (400°C et 500°C).

Les résultats les plus remarquables sont observés pour le biochar carbonisé à 500°C avec des concentrations de 4% et 8%, où le nombre moyen de racines dépasse 10. L'effet du biochar sur le nombre de racines est également plus prononcé à j8 qu'à j3, indiquant un développement racinaire plus important stimulé par le biochar après une période de germination plus longue.

Le nombre de racines des plantules "contrôle" après 3 jours de germination est généralement le plus bas parmi toutes les conditions testées, indiquant un développement racinaire limité en l'absence de biochar (Figure n°38).

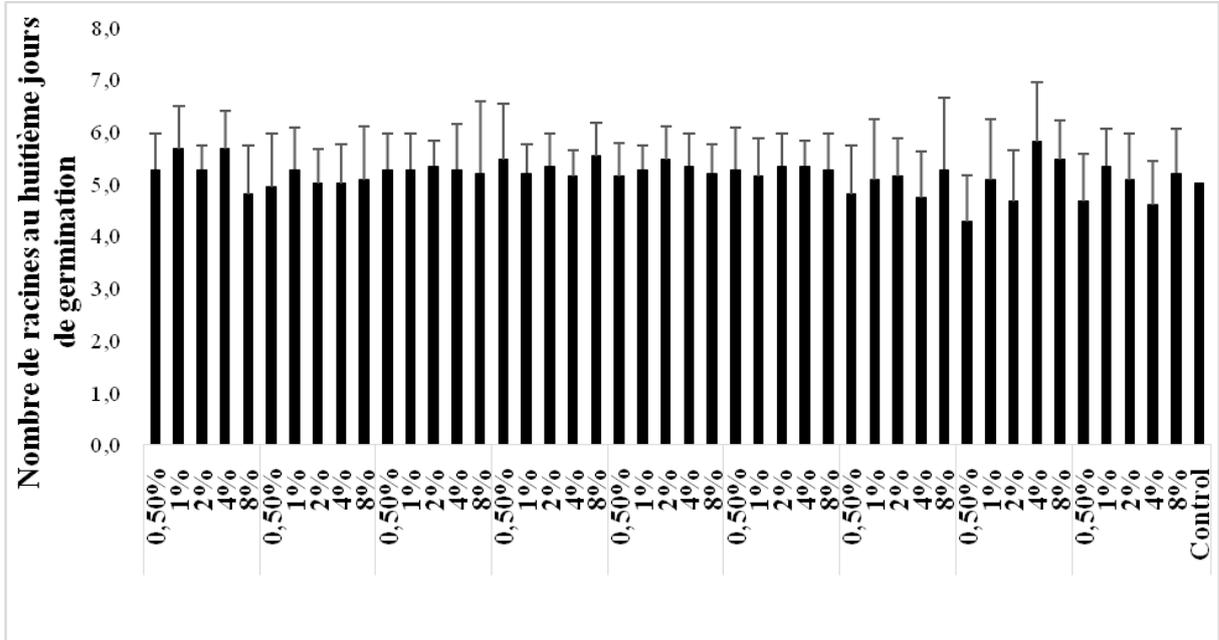


Figure N° 38: Nombre des racines au j8 de germination (orge)

- **Longueur de coléoptiles après 3 jours de germination**

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à les température (300°C et 500°C), en particulier à des concentrations de 4% et 8%, peut favoriser de manière significative la croissance des coléoptiles d'orge après 3 jours de germination. Pour le groupe témoin on observe une croissance naturelle moyenne de longueur des racines cela suggère qu'une différence n'est pas significative (Figure n° 39).

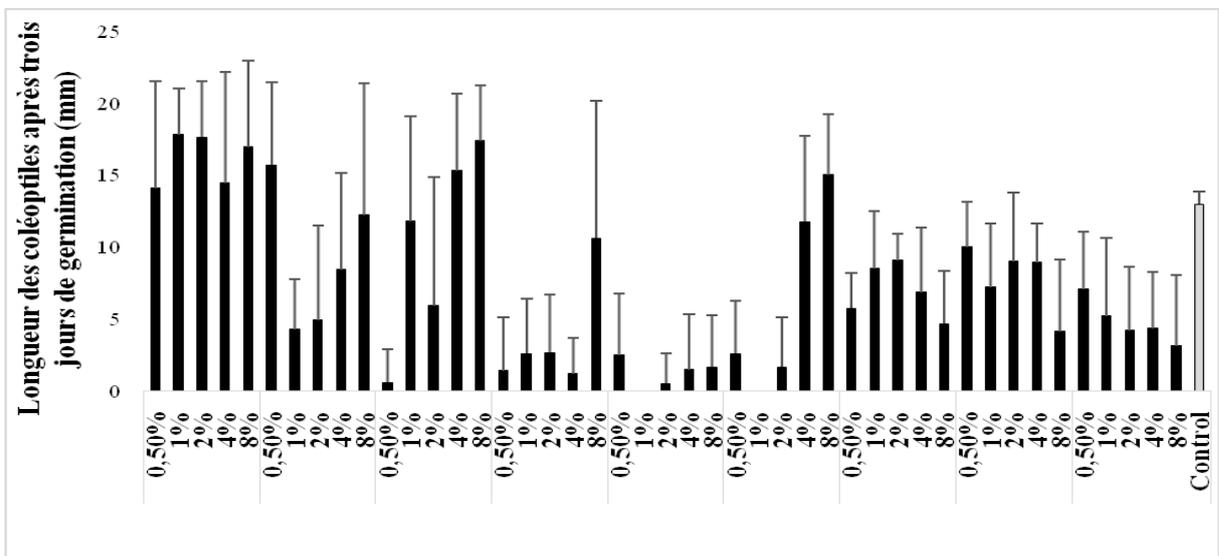


Figure N° 39: Longueur des coléoptiles après 3 jours de germination

- **Longueur des coléoptiles après huit jours de germination**

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à les température (300°C, 400°C et 500°C), en particulier à des concentrations de 4% et 8%, peut favoriser de manière significative la croissance des coléoptiles d'orge après 8 jours de germination. On observe une tendance générale à l'augmentation de la longueur des coléoptiles avec des températures de carbonisation (300°C et 400°C), particulièrement pour les concentrations de biochar de 4% et 8%. On observe que l'effet positif du biochar sur la longueur des coléoptiles d'orge s'accroît avec le temps de germination. Cela suggère que le biochar continue à libérer des nutriments et à améliorer la structure du sol au fil du temps, ce qui profite à la croissance des plantes une tendance de croissance de groupe témoin dépasse 70mm (Figure n°40).

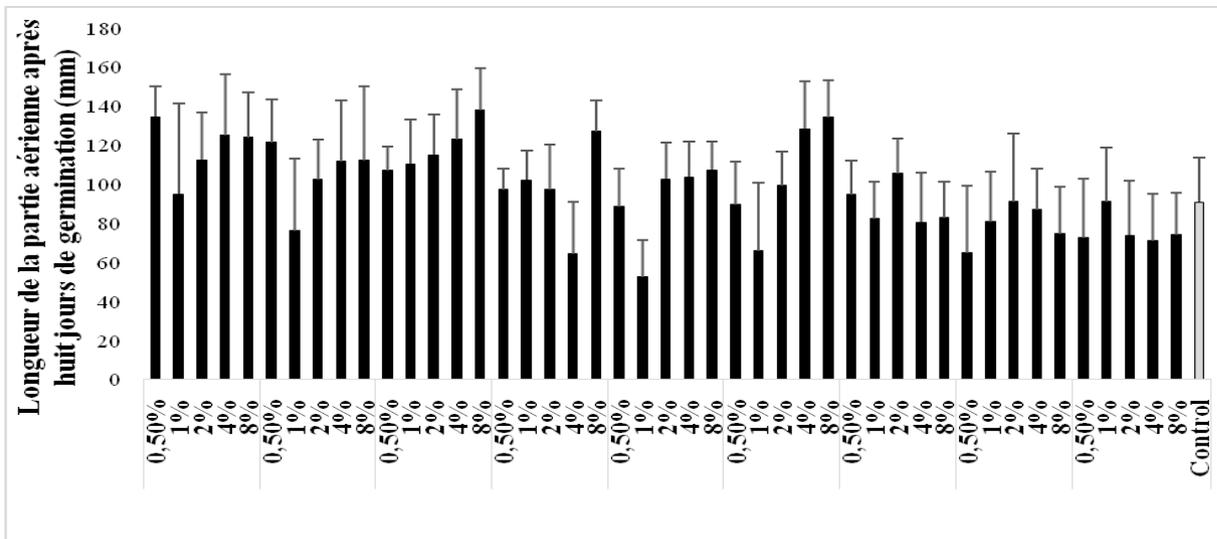


Figure N° 40: Longueur de la partie aérienne « coléoptiles » après huit jours de germination

- **Longueur de la feuille après huit jours**

Ce graphique fournit des informations prometteuses sur l'impact potentiel du biochar carbonisé sur la croissance des feuilles d'orge après 8 jours de germination. Les résultats suggèrent que le biochar carbonisé à température (300°C et 400°C), en particulier à des concentrations de 0,5%, 4% et 8%, où la longueur moyenne des feuilles dépasse 120 mm pourrait être un amendement bénéfique pour favoriser la croissance des feuilles et potentiellement la santé des plantules d'orge pour le groupe témoin on observe une augmentation de longueur dépasse 80mm (Figure n° 41).

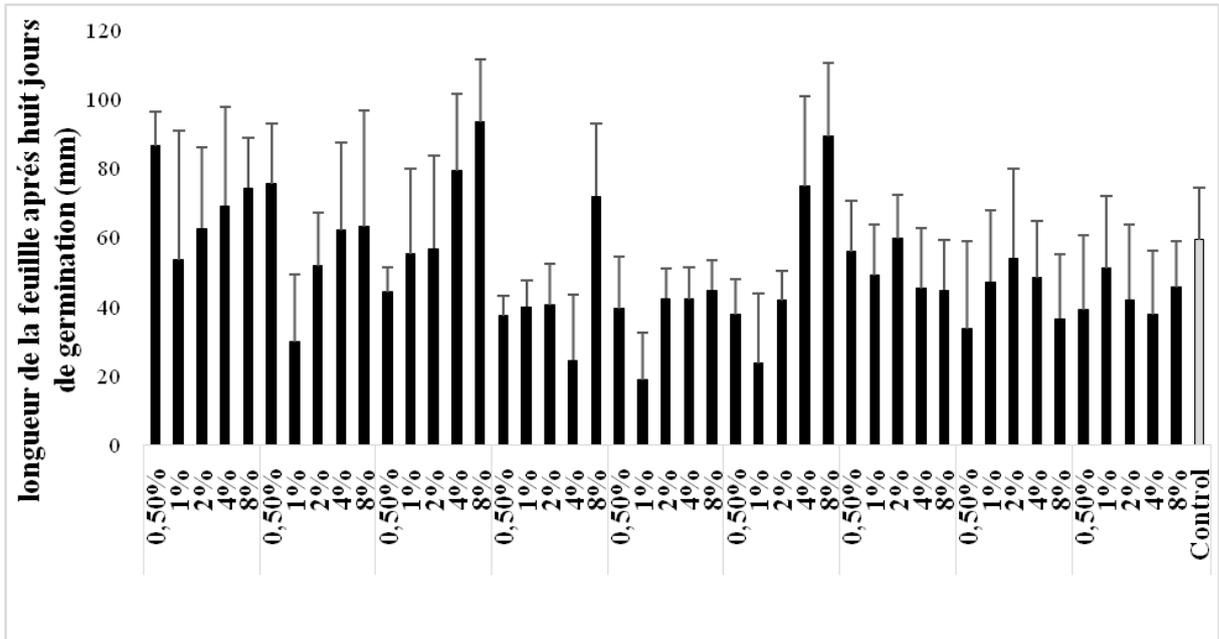


Figure N° 41: Longueur de la feuille après huit jours de germination

II.1.1.6. Croissance eau gélisée (laitue)

➤ Longueur des racines au j3

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à haute température (300°C, 400°C et 500°C), en particulier à des concentrations de 2%, 4% et 8%, peut favoriser de manière significative la croissance des racines de laitue après 3 jours de germination où la longueur moyenne des racines dépasse 20 mm. Une longueur moyenne significativement plus élevée dans les groupes avec biochar que dans le groupe contrôle suggère un effet positif du biochar (Figure n°42).

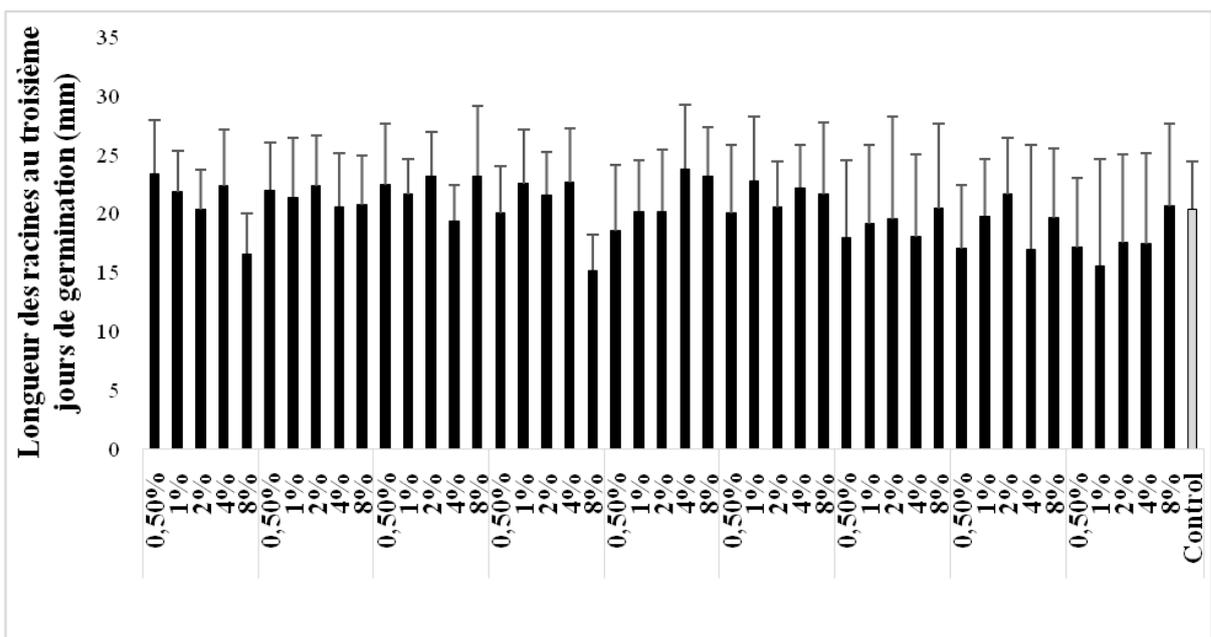


Figure N° 42: Longueur des racines au j3 de germination

➤ **Longueur des racines au j8**

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à température 300°C, à des concentrations de 4% et 8%, peut favoriser de manière significative la croissance des racines de laitue après 8 jours de germination. et pour les températures 400°C et 500°C on observe une augmentation où la longueur des racine dépasse 25mm et pour le groupe témoin, les résultats montrent une croissance naturelle qui augmente avec le temps, la longueur dépasse 25mm (Figure n°43).

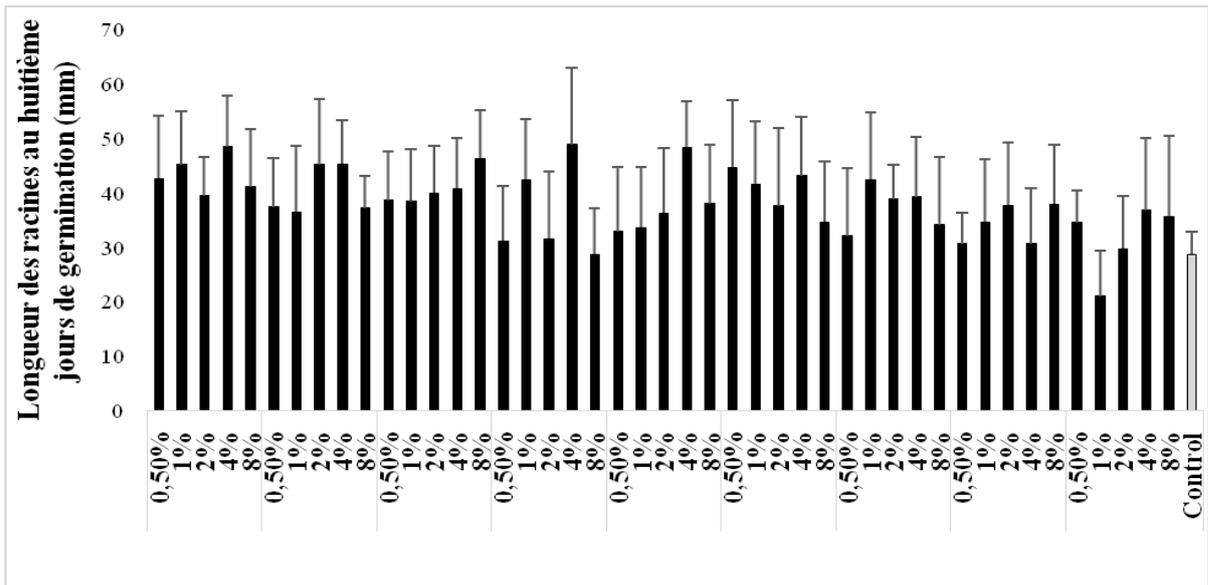


Figure N° 43: Longueur des racines au j8 de germination (laitue)

➤ **Longueur de coléoptiles après 3 jours de germination**

Ces résultats suggèrent que le biochar carbonisé à les trois température (300°C, 400°C et 500°C), en particulier à des concentrations de 2%, 4% et 8%, peut favoriser de manière significative la croissance des coléoptiles de laitue après 3 jours de germination. On observe que n'est pas une différence significative entre les trois biochar et la durée de carbonisation n'a pas un effet sur la croissance et pour la longueur moyenne des coléoptiles des plantules témoins est significativement supérieure à celle des plantules expérimentaux (la longueur dépasse 25mm) (Figure n°44).

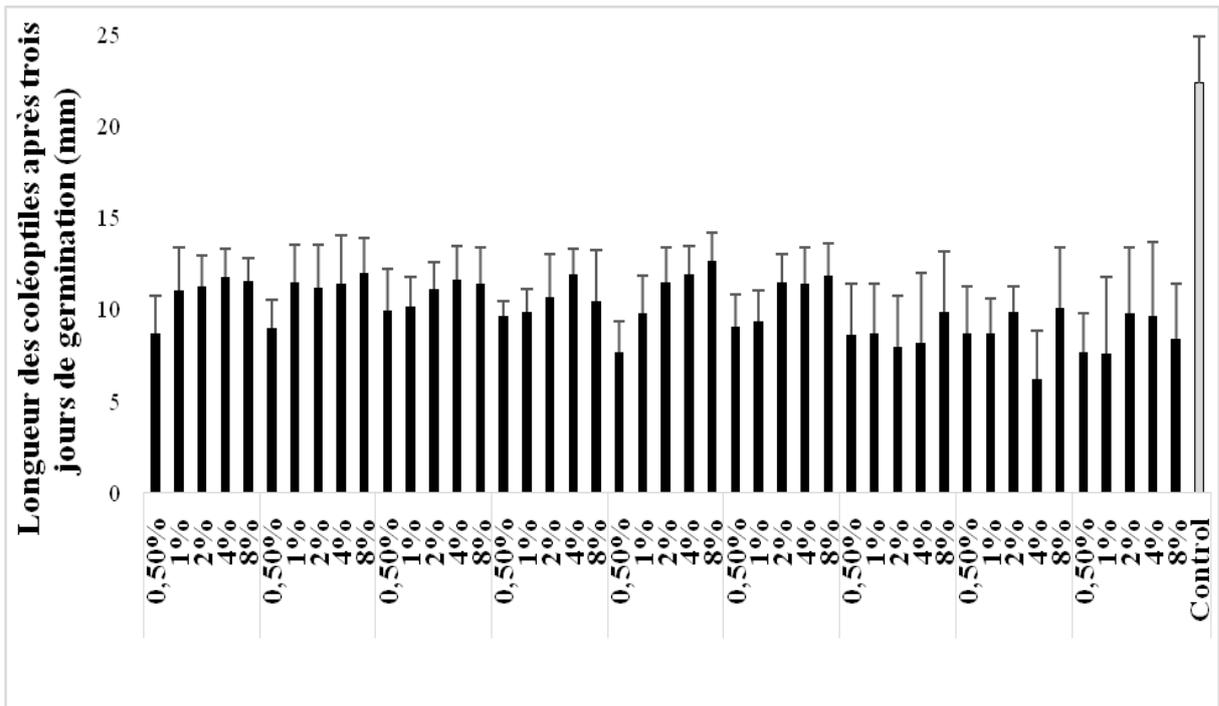


Figure N° 44: Longueur des coléoptiles après 3 jours de germination (laitue)

➤ **Longueur des coléoptiles après 8 jours de germination**

Le graphique montre l'effet de la concentration de biochar et de la température de carbonisation sur la longueur des coléoptiles de laitue. On peut observer que la longueur des coléoptiles augmente généralement avec la concentration de biochar, pour toutes les températures de carbonisation. L'effet de la température de carbonisation est moins clair, mais il semble que la longueur des coléoptiles soit la plus élevée pour une température de carbonisation de 400°C.

La longueur des coléoptiles n'a pas une tendance, on observe que la ligne grise se situe en dessous des autres lignes (25mm), cela suggère que le biochar a un effet positif sur la croissance. Figure n°45

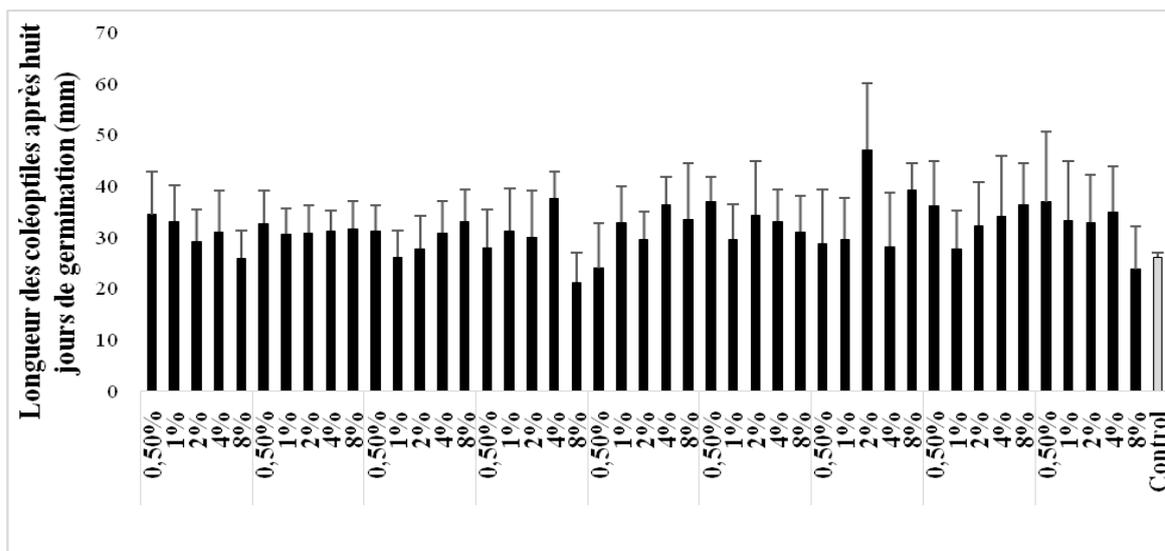


Figure N° 45: Longueur des coléoptiles après 8 jours de germination (laitue)

II.1.2. Lutte biologique contre *Fusarium*

II.1.2.1. Influence du milieu de culture sur la croissance fongique

➤ *Fusarium oxysporum*

Sur le milieu PDA (témoin), la croissance radiale de *Fusarium oxysporum* augmente rapidement pendant les premiers jours d'incubation, puis se stabilise. La croissance maximale est atteinte vers le J7, avec une valeur d'environ 4,5 cm.

Sur le milieu macérat + PDA, la croissance radiale de *Fusarium oxysporum* est légèrement inférieure à celle observée sur le milieu PDA. La croissance maximale est atteinte vers le J7, avec une valeur d'environ 6,32 cm.

Sur le milieu biochar, la croissance radiale de *Fusarium oxysporum* est fortement inhibée vers le premier jour (00cm).

➤ *Fusarium solani*

Sur le milieu PDA (témoin), la croissance radiale de *Fusarium solani* augmente rapidement pendant les premiers jours d'incubation, puis se stabilise. La croissance maximale est atteinte vers le J7, avec une valeur d'environ 5,58 cm.

Sur le milieu macérat de biochar + PDA, la croissance radiale de *Fusarium solani* est légèrement inférieure à celle observée sur le milieu PDA. La croissance maximale est atteinte vers le J7, avec une valeur d'environ 5,43 cm.

Sur le milieu biochar + agar, la croissance radiale de *Fusarium solani* est fortement inhibée vers le premier jour.

Le biochar a un effet inhibiteur sur la croissance radiale de *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*. Cet effet inhibiteur est plus important sur le milieu biochar + agar que sur le milieu macérat de biochar + PDA. Cela suggère que le biochar pourrait être utilisé comme agent de lutte contre ces champignons pathogènes (Figure n°46).

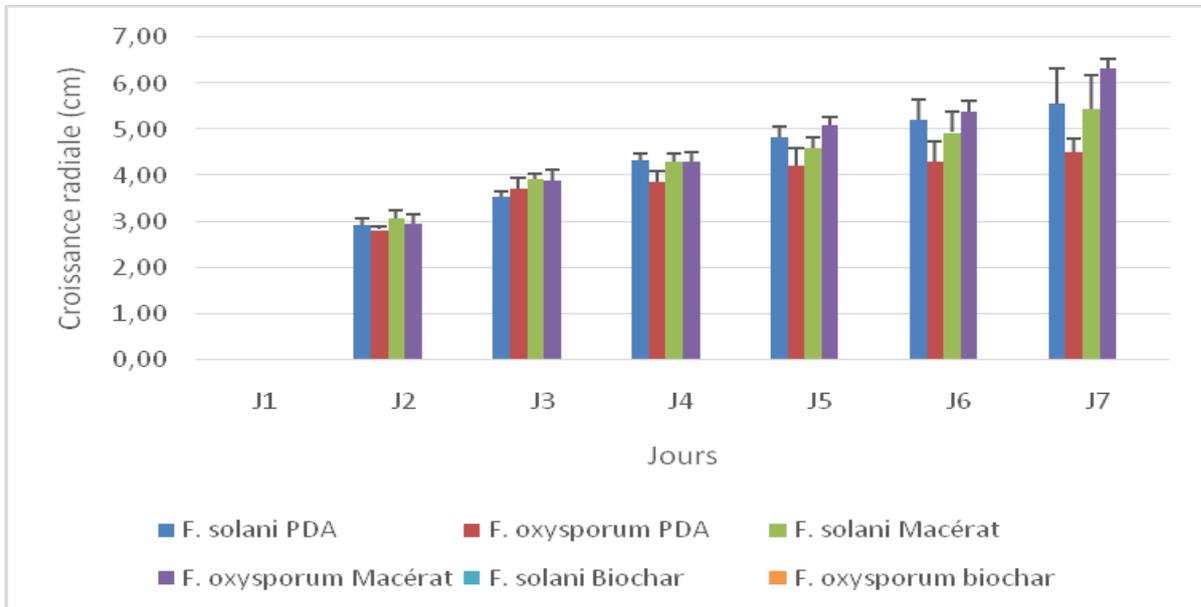


Figure N° 46: la croissance radiale de *Fusarium* pendant 7jours

II.1.2.2. Evolution sur milieux

➤ Milieu PDA

On peut voir que la distance parcourue par ce groupe augmente régulièrement au fil du temps, le premier jour on observe aucune croissance, pour le deuxième jour on observe que la distance moyenne parcourue est d'environ 2cm, à la fin de l'étude, la distance moyenne parcourue est d'environ 5,05 cm.

➤ Milieu PDA + Macérat

On peut voir que la distance parcourue par ce groupe augmente également régulièrement au fil du temps, le premier jour on observe aucune croissance, pour le deuxième jour on observe que la distance moyenne parcourue est d'environ 3cm, à la fin de l'étude, la distance moyenne parcourue est d'environ 5,88 cm.

➤ Milieu Biochar

On peut voir qu'il n'y a pas de croissance observable des champignons pathogènes, ce qui suggère une possible activité inhibitrice de croissance pour ces champignons.

➤ **Comparaison entre milieu PDA et milieu PDA + macérat**

Les résultats suggèrent que le macérat de biochar ajouté au milieu PDA pourrait avoir un léger effet stimulant sur la croissance de *Fusarium*. Cette comparaison est basée sur l'observation des distances radiales plus grandes sur le milieu contenant du biochar par rapport au PDA seul.

➤ **Comparaison entre les trois milieux de culture :**

Les résultats indiquent que le milieu PDA seul montre une croissance progressive du *Fusarium*, avec des valeurs de distance radiale augmentant régulièrement, le milieu de Macérat de biochar + PDA présente des distances radiales légèrement plus élevées par rapport au PDA seul, indiquant potentiellement une croissance légèrement favorisée par l'ajout de biochar et le milieu de Biochar seul montre des valeurs de distance radiale de 0,00 à tous les jours, ce qui suggère que le biochar seul n'est pas favorable à la croissance du *Fusarium* et peut même avoir un effet inhibiteur (Figure n°47).

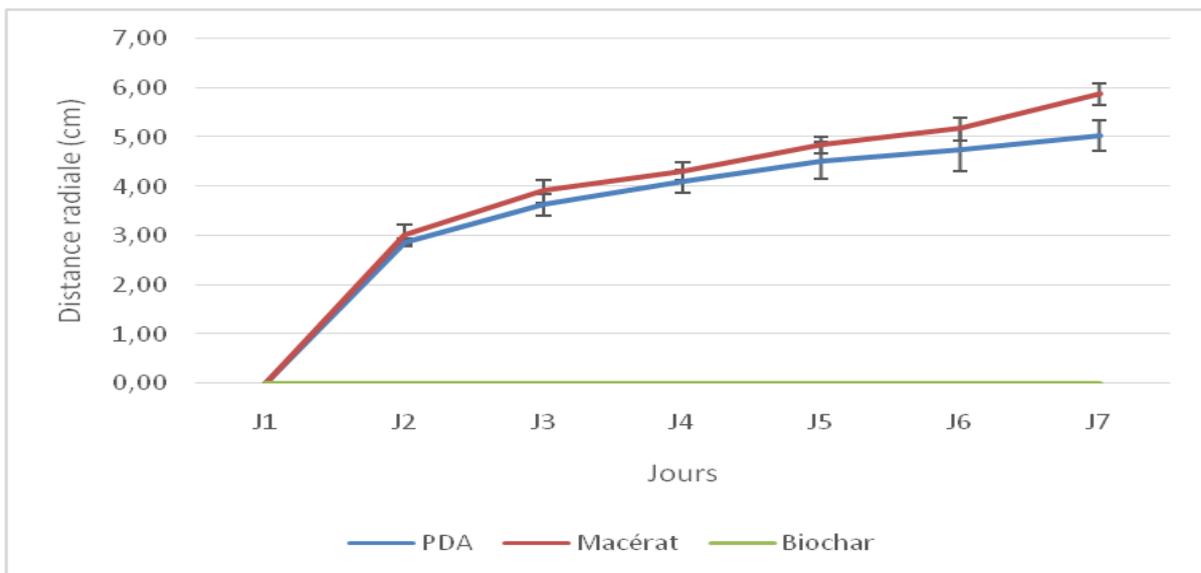


Figure N° 47: La distance radiale (cm) de fusarium pendant 7jours sur les milieux

II.2. Discussion

Le test antifongique *in vitro* a permis d'estimer le potentiel inhibiteur de biochar à trois différentes températures (300°C, 400°C et 500°C) et durée de carbonisation avec des concentration vis-à-vis des deux souches mycotoxinogènes *F. oxysporum* et *F. solani*, cette évaluation a révélé des intensité inhibitrices variables selon les souches mycotoxinogènes et la nature des milieux.

Le biochar est un produit résultant de la pyrolyse à haute teneur en carbone qui encourage la croissance des plantes et diminue les maladies (Elad et al., 2011).

Afin de fabriquer du biochar, on procède à la pyrolyse de la biomasse dans un environnement où les niveaux d'oxygène sont contrôlés. Quand différents déchets organiques sont soumis à une chaleur comprise entre 200 et 900 °C, sans oxygène ou air, on parle de pyrolyse (Bonanomi et al., 2015). Au XXI^e siècle, le compost et le biochar sont considérés comme des alternatives efficaces sans utilisation de pesticides pour augmenter les rendements agricoles. Même si l'incorporation de biochar dans le sol est une méthode ancienne pour améliorer la qualité du sol (Khan et al., 2023), ce n'est que depuis deux décennies que les chercheurs ont manifesté un intérêt important pour le biochar en tant qu'agent de protection des plantes organique et outil de stockage du carbone (Lehmann et al., 2015).

Dans notre étude, deux parties ont été réalisées ; la phytotoxicité de biochar et la lutte biologique *in vitro*.

L'essai de phytotoxicité de biochar culture *in vitro*, appliqué sur les échantillons des graines (orge-laitue), a montré l'effet fortement bénéfique pour la germination et la croissance des plantes. Nous avons observé *in vitro* qu'une différence non significative entre les trois biochars différents en température, durée et concentration.

Le biochar qui était pyrolysé à 300°C pendant 3h est le meilleur choix pour le test de lutte biologique car il est économique et gagnant du temps.

Les résultats de cette étude pourraient avoir des implications importantes pour la lutte contre les maladies fongiques des plantes causées par *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*. L'utilisation de biochar comme amendement du sol pourrait aider à réduire les populations de ces champignons pathogènes et à protéger les cultures. Cette inhibition était plus marquée.

Des recherches ont mis en évidence que l'amendement des sols agricoles avec des quantités spécifiques de biochar peut significativement contribuer à la lutte contre les agents phytopathogènes (Elad et al., 2010 ; Elmer et Pignatello, 2011 ; Graber et Elad, 2013 ; Jaiswal et al., 2014 ; Lehmann et al., 2011).

Selon Graber et Elad (2013), l'efficacité de l'utilisation du biochar pour renforcer la résistance contre les agents pathogènes dépend de la source de matière première, des conditions de production du biochar telles que la température, ainsi que de la quantité et du moment d'application du produit, en plus de la nature spécifique de la maladie.

Des recherches ont révélé que l'utilisation de charbon de bois de noix de coco et de biochar à base de poussière de bois peut réduire l'impact des pathogènes *Fusarium* sur les asperges (Elmer et Pignatello, 2011 ; Matsubara et al., 2002). Par exemple, Elmer et Pignatello (2011) ont montré que l'ajout de 3 % (v/v) de biochar permet de réduire les lésions racinaires causées par *Fusarium* chez ces plantes. Ce phénomène s'applique également aux tomates, comme l'ont démontré Nerome et al. (2005), qui ont constaté une réduction significative de l'infection par *Ralstonia solanacearum* grâce à l'ajout de 20 % (v/v) de biochar.

Des études ont été réalisées sur l'impact du biochar sur la propagation des maladies telluriques ont été très divergentes. Tandis que certaines recherches ont montré un effet très faible (Matsubara et al., 2002) ou nul (Gravel et al., 2013) sur la disparition des maladies, d'autres ont constaté une augmentation de la gravité des maladies (Copley et al., 2015) après l'application de biochar. D'autres recherches ont démontré que les maladies sont moins graves en fonction d'une courbe de réponse à dose en forme de U (Zwart et al., 2012) ou d'une courbe de réponse à dose linéaire (Elmer et al., 2011).

Selon notre recherche et l'essai de lutte biologique en utilisant le biochar de sciure de bois à température 300°C et durée de carbonisation de 3h les champignons de *Fusarium* ont été inhibés à 100% dans le milieu de biochar par apport les milieux de PDA + macérat de biochar il a une croissance.

Dans cette étude, le biochar est la source végétale qui est dérivée comme moyen de lutte biologique qui est devenu efficace et sûr et un moyen biologique prometteur pour éviter tous les risques chimiques, le biochar a également été signalé comme un agent antifongique contre les champignons et les pathogènes.

Par contre, la chimiothérapie présente de nombreux inconvénients liés à la pollution, à la toxicité des plantes, au déséquilibre biologique et surtout au risque de sélection de souches résistantes aux fongicides (**Hajji et al., 2016**).

Il y a également un traitement des produits périssables en utilisant des fongicides chimiques de synthèse dont l'emploi a été limité en raison des effets indésirables détectés. Certains sont cancérigènes, toxiques à grande échelle, avec une durée de dégradation prolongée et une pollution de l'habitat. La sécurité humaine est menacée par leur présence, ce qui suscite un intérêt croissant pour une agriculture sans résidus chimiques (**Kossonou et al., 2019**).

A l'instar de ces résultats, nous suggérons que notre produit le biochar se sciure de bois a un effet inhibiteur et une activité antifongique contre les maladies de pourriture racinaire qui infecte la tomate causée par *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* et elle est considérée comme un outil puissant, qui peut donc avoir des intérêts pratiques en lutte biologique.

Conclusion

Générale

La culture de la tomate occupe une place très importante dans l'économie agricole Algérienne. Ce fruit est toujours sensible aux maladies tel que la fusariose causée par les agents pathogènes *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani*.

Cette recherche, vise à contribuer aux études sur la lutte biologique vis-à-vis des champignons pathogènes tel que les espèces de *Fusarium*. Ces agents pathogènes sont responsables de maladies vasculaires graves chez les plantes, telles que les fusarioses et les pourritures racinaires.

Ce travail suggère que l'application du biochar de sciure de bois utilisé dans cette étude peut réduire significative la propagation de *Fusarium oxysporum* et *Fusarium solani* dans les cultures de tomate

Le biochar peut être utilisé comme un agent antifongique *in vitro* et *in vivo*, pour inhiber le champignon et favoriser la croissance des racines des plantes.

Cette action de biocontrôle a donné des résultats encourageants dans la lutte contre ces maladies fongiques.

Les résultats de la lutte biologique *in vitro* ont montré que le biochar de sciure de bois a un effet inhibiteur vis-à-vis les deux souches fongiques pathogènes.

Cette recherche souligne l'importance de poursuivre les études sur la lutte biologique avec des substances naturelles comme le biochar. Cette approche représente une alternative respectueuse de l'environnement par rapport aux méthodes chimiques, contribuant ainsi à une agriculture plus durable. En favorisant l'adoption de pratiques agricoles écologiques, l'utilisation du biochar de sciure peut réduire l'impact environnemental tout en préservant la productivité agricole.

Références
bibliographiques

- Akladios S.A., Isaac G.S., Abu-Tahon M., 2015. Induction and resistance against *Fusarium* wilt disease of tomato by using sweet basil (*Ocimum basilicum* L) extract. *Canadian Journal of Plant Science*, 95: 689-701.
- Atkinson, J.C., Fitzgerald, J.D., Hipps, N. A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337: 1–18.
- Bakkali, F., Averbeck, S., Averbeck, D., & Idaomar, M. (2008). Biological effects of essential oils - A review. In *Food and Chemical Toxicology*. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2007.09.106>
- Barnard, C., Daberkow, S., Padgett, M., Smith, M. E., & Uri, N. D. (1997). Alternative measures of pesticide use. *Science of the Total Environment*. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00151-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00151-4)
- Biswas S.K., Pandey N.K., Rajik M., 2012. Inductions of Defense Response in Tomato against *Fusarium* Wilt through Inorganic Chemicals as Inducers. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 3(4): 1-7.
- Bonanomi, G.; Ippolito, F.; Scala, F. A “Black” Future for Plant Pathology? Biochar as a New Soil Amendment for Controlling Plant Diseases. *J. Plant Pathol.* 2015, 97, 223–234.
- Dean R. et al., 2012. « The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology », *Molecular Plant Pathology*, vol. 13, no 4, p. 414–430.
- Elad, Y., David, D.R., Harel, Y.M., Borenshtein, M., Ben Kalifa, H., Silber, A., Graber, E.R. 2010. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, 100: 913-921.
- Elad, Y.; Cytryn, E.; Meller Harel, Y.; Lew, B.; Graber, E.R. The Biochar Effect: Plant Resistance to Biotic Stresses. *Phytopathol.Mediterr.* 2011, 50, 335–349.
- Gravel, V.; Dorais, M.; Ménard, C. Organic Potted Plants Amended with Biochar: Its Effect on Growth and *Pythium Colonization*. *Can. J. Plant Sci.* 2013, 93, 1217–1227. [CrossRef]
- Jaiswal, A.K., Elad, Y., Graber, E.R., Frenkel, O. 2014. *Rhizoctonia solani* suppression and plant growth promotion in cucumber as affected by biochar pyrolysis temperature, feedstock and concentration. *Soil Biology and Biochemistry*, 69: 110-118

- Karimi, K., Amini, J., Harighi, B., & Bahramnejad, B. (2012). Evaluation of biocontrol potential of *Pseudomonas* and *Bacillus* spp. against *Fusarium* wilt of chickpea. *Australian Journal of Crop Science*, 6(4), 695–703.
- Khan, N.; Bolan, N.; Josph, S.; Anh, M.T.L.; Meier, S.; Kookana, R.; Borchard, N.; Sánchez-Monedero, M.A.; Jindo, K.; Solaiman, Z.M. Complementing Compost with Biochar for Agriculture, Soil Remediation and Climate Mitigation. *Adv. Agron.* 2023, 179,1–90.
- Kossonou Yao K., Kouakou-Kouame A., Kofi Affoué C., Koffi Yao M., Tra Bi Fézan H., Tano K., 2019. Activité antifongique in vitro des extraits de cinq plantes locales sur *Colletotrichum higinisianum*, *Fusarium oxysporum* et *Rhizopus stolonifer*, agents pathogènes de la papaye (*Carica papaya* L.) et de la tomate (*Solanum lycopersicum* L). *European Scientific Journal*, 15(9): 1857-7881.
- Lang, G., & Buchbauer, G. (2012). A review on recent research results (2008-2010) on essential oils as antimicrobials and antifungals. A review. In *Flavour and Fragrance Journal*. <https://doi.org/10.1002/ffj.2082>
- Lehmann, J. Bio-Energy in the Black. *Front. Ecol. Environ.* 2007, 5, 381–387. [CrossRef]
- Lehmann, J.; Joseph, S. Biochar for Environmental Management: An Introduction. In *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*; Routledge: London, UK, 2015.
- Mannai, S., Benfradj, N., Horrigue-raouani, N., & Hamdi, N. B. (2018). Antifungal activity and growth promotion of three types of compost extracts against *Fusarium oxysporum* and *Fusarium solani* associated with peach seedling decline in nurseries. *Journal of Crop Protection*, 7(3), 349–363.
- Matsubara, Y.; Hasegawa, N.; Fukui, H. Incidence of Fusarium Root Rot in Asparagus Seedlings Infected with Arbuscular Mycorrhizal Fungus as Affected by Several Soil Amendments. *J. Jpn. Soc. Hortic. Sci.* 2002, 71, 370–374.
- Nasrin L., Podder S., Mahmud M.R., 2018. Investigation of Potential Biological Control of *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* by Plant Extracts, Antagonistic sp. and Chemical Elicitors *in vitro*. *Fungal Genomics and Biology*, 8(1) : 1-4.
- O'Donnell, Kerry, Ward, T. J., Robert, V. A. R. G., Crous, P. W., Geiser, D. M., & Kang, S. (2015). DNA sequence-based identification of *Fusarium* : Current status and future

- directions. In *Phytoparasitica* (Vol. 43, Issue 5).
<https://doi.org/10.1007/s126000150484z>
- O'Donnell K., Kistler H., Tacke B., & Casper H., 2000. Gene genealogies reveal global phylogeographic structure and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum*, the fungus causing wheat scab. *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(14): 7905–7910, ISSN 1091-6490.
- Rakotoarimanga N., Zananirina J., Ramamonjisoa D., Ramanankierana H., 2014. Lutte biologique antifongique : actinomycètes du sol rhizosphérique antagonistes de *Fusarium* isolé du fruit de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) pourri. *Afrique science*, 10(3): 243–255.
- Rezaee, S., Gharanjik, S., & Mojerlou, S. (2018). Morphological and molecular approaches. 7(2), 161–170.
- Silva T.D., Almeida C.M.A., Malafaia C.B., Oliveira L.M.S., Silva M.V., Correia M.T.S., 2017. Analysis of protein profile of tomato root infected with *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici*. *Genetics and Molecular Research*, 16(2): 1-10.
- Sombroek, W.I.M.; Ruivo, M.D.L.; Fearnside, P.M.; Glaser, B.; Lehmann, J. Amazonian Dark Earths as Carbon Stores and Sinks. In *Amazonian Dark Earths: Origin Properties Management*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2003; pp. 125–139.
- Worku M., Sahe S., 2018. Review on Disease Management Practice of Tomato Wilt Caused *Fusarium oxysporum* in Case of Ethiopia. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 9(11): 4 p.
- Yakoubi, M., Hamini-kadar, N., Gherib, M., Amrouche, A., Yezli, W., Benichou, S. L., & Kihal, M. (2019). Inhibitory effect of essential oils from *Pulicaria mauritanica* and *Micromeria debilis* on growth of *Alternaria* spp., the causal agent of tomato early blight. *Environmental and Experimental Biology*, 17.
- Yezli, W., Zebboudj-Yezli, N., Hamini-Kadar, N., Kihal, M., & Henni, J. E. (2015). An *in vitro* antagonistic activity evaluation of rhizobacteria against *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-lycopersici* (Forl) isolated from the Algerian west. *International Journal of Biosciences* 95-103.

Zebboudj, N., Yezli, W., Hamini-Kadar, N., & Kihal, M. (2020). Antifungal activity of lactic acid bacteria against *Fusarium* species responsible for tomato crown and root rots. *Environ. Exp. Biol*, 18, 7-13.

Zebboudj, N., Yezli, W., Hamini-Kadar, N., Kihal, M., & Henni, J. E. (2014). Antifungal activity of lactic acid bacteria against *Fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* isolated from diseased date palm in South Algeria. *International Journal of Biosciences* 99-106.

Annexes

Annexe N° 1**Composition des milieux de culture**

Les milieux de culture ont été autoclavés à 120 °C pendant 20 minutes sous pression de 1 bar

Milieu PDA pH 6,5

Il est conseillé d'utiliser ce lieu pour isoler et identifier les moisissures et les levures présentes dans les produits alimentaires (Botton et al., 1990). Le PDA (Potato Dextrose Agar) est un milieu de culture qui contient de la pomme de terre, du glucose et de l'agar-agar. Le milieu en asepsie totale est composé de la manière suivante :

- Pomme de terre 200g
- Dextrose 20g
- Agar agar 20g
- Eau Distillée q.s.p. 1000ml

Milieu Agar 2 %

Le milieu Agar a été découvert et utilisé pour la première fois par Walther Hesse en (1882). Hesse était un assistant de laboratoire pour Julius Richard Petri, et il a découvert que l'agar, un polysaccharide extrait des algues rouges, pouvait être utilisé pour solidifier les milieux de culture microbiens. Cette découverte a permis de développer la technique de culture sur milieu solide en microbiologie, facilitant ainsi l'isolement et l'étude des micro-organismes. Le milieu en asepsie totale est composé de la manière suivante :

- Agar agar10g
- Eau distillée.....1000ml

Annexe n° 02



A ; laitue ; eau gélosée



B ; laitue ; sable



C : orge ; eau gélosée



D : orge ; sable

Figure n° : Les plantes orge laitue après la germination pendant 8Jours



F. oxysporum ; macérat



F. solani ; macérat



F. oxysporum ; PDA



F. solani ; PDA



F. oxysporum ; biochar



F. solani ; biochar

Figure n° : Croissance de *Fusarium* sur les trois milieux différents.