République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la

Recherche Scientifique

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi –Tébessa

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Biologie des êtres vivants

MEMOIRE de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science de la nature et de la vie (SNV)

Filière : Biotechnologies
Spécialité : Biotechnologies végétale

Evaluation de l'amendement organique sur l'aspect qualitatif des composantes nutritionnelles de l'Orge *(Hordeum vulgare)*

Présenté par :

- **MENACEUR Afaf.**
- **DJELLALI Chahd.**

Devant le jury

Pr Neffar Souad	**Université de Tébessa**	**Président**
Dr Ghdabnia Karima	**Université de Tébessa**	**Examinatrice**
Pr. Boudjabi Sonia	**Université de Tébessa**	**Promoteur**

Date de soutenance 10 Juin 2025

Note : /20

Année universitaire 2024/2025

Dédicace

Tout d'abord, et surtout, grâce à Dieu, la source de puissance, de patience et de sagesse tout au long de ce voyage.

Pour ma chère **mère**, pour son amour sans fin, ses prières silencieuses et son soutien inestimable.

Pour mon **père**, pour ses sacrifices, ses conseils et son existence rassurante.

À mes frères **Ossama**, **Ahmed** et mes sœurs, **Omeima** et **Tesnim**, pour leur émotion, leur encouragement et leur confiance en soi.

À **ma famille**, pour le soutien doux et constant ne m'a jamais fait défaut.

Et à mes amis proches **Afaf** , **Dhouha** et **Meriem** ,pour les soutenir, écouter, et leurs mots confortables et les moments communs, même dans les périodes les plus difficiles.

Et à ma copine, peu importe à quelle distance, le plus proche du cœur reste ma sœur **Souad**.

Merci à tous, du fond du cœur.

Chahd

Dédicace

Je tiens tout d'abord à remercier **Allah le Tout-Puissant**, qui m'a accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Je dédie ce mémoire à :

– À mon cher **père**, qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et lui ouvre les portes du paradis.

_ À ma tendre **mère**, que Dieu la protège et la récompense pour son amour inconditionnel, ses prières et sa patience infinie.

– Mes frères, **Abd-Ltayf**, **Saddek** et **Hamza**, pour leur soutien, leur aide précieuse et leur présence constante.

– Toute **ma famille**, ainsi que tous ceux qui ont prié pour moi et m'ont soutenue de près ou de loin.

– **Mes ami(e)s fidèles**, pour leur encouragement, leur bienveillance et leur soutien tout au long de ce parcours.

Que Dieu vous bénisse et vous comble de ses bienfaits

Afaf

Remerciements

Avant tout, nous remercions **ALLAH,** le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la patience, la santé et la force nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre promotrice, **Pr. BOUDJABI Sonia**, Professeure à l'Université de Tébessa, pour sa disponibilité, son encadrement bienveillant, ses conseils précieux et son soutien tout au long de ce mémoire. Votre rigueur scientifique et votre confiance ont été pour nous une source de motivation constante.

Nos remerciements également pour les membres du jury, pour l'honneur qu'elles nous font en acceptant de juger ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'elles y ont porté à travers leurs observations et leurs remarques constructives.

Nous remercions tout particulièrement la doctorante **Mademoiselle Debab Aya**, pour nous avoir gracieusement fourni le matériel végétal indispensable à cette étude et pour son soutien constant.

Nous adressons aussi notre reconnaissance à **l'ensemble du personnel** du Département de Biologie des Êtres Vivants pour leur accueil, leur aide et leur disponibilité tout au long de cette année universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier chaleureusement **nos familles, nos proches** et **nos camarades** pour leur soutien moral, leurs encouragements et leur patience pendant la réalisation de ce mémoire.

Résumé

L'amélioration de la qualité nutritionnelle des cultures représente aujourd'hui un enjeu majeur pour la sécurité alimentaire. Parmi les pratiques agronomiques durables, l'utilisation d'amendements organiques tels que le compost et le biochar constitue une alternative prometteuse pour enrichir le sol tout en optimisant la qualité des productions végétales. Cette étude porte sur l'évaluation de l'impact de trois doses croissantes de biochar (B1 = 141,73 g/m², B2 = 236,22 g/m², B3 = 472,44 g/m²) et de compost (C1 = 307,08 g/m², C2 = 614,17 g/m², C3 = 1228,34 g/m²) sur la qualité nutritionnelle de l'orge (*Hordeum vulgare* L.). Les analyses ont porté sur plusieurs paramètres : taux de cendres, amidon, amylose, amylopectine, sucres totaux, sucres réducteurs et aussi le carbone organique dans le sol. Les résultats montrent une augmentation significative dans le taux de cendres (jusqu'à 3,12 % avec B3) en comparaison avec le plante témoin. Cependant il s'est dégagé une diminution dans l'ensemble des variables de qualité restantes (Amidon, amylose et amylopectine sucres totaux et réducteurs) ou toutes les valeurs soulignaient des teneurs inferieurs par rapport au témoin. Cependant l'apport du biochar dépassait celui du compost. En effet, avec le biochar il s'est dégagé une supériorité dans la teneur des sucres totaux (3,58 %), sucres réducteurs (11,77 %),amidon(65,63%),amylose(13,12%)et amylopectine (52,51%) en comparaison avec le compost qui a montré respectivement les teneurs inférieurs suivantes (3.47%), (11.71%), (65,49%), (13,09%)et (52,39%) . En revanche l'apport du compost était plus déterminant en termes de carbone organique dans le sol. Ce paramètre a atteint un pic avec la dose C3 (3,08 %), confirmant l'effet cumulatif des doses élevées.

Mots-clés : Biochar, compost, orge, *Hordeum vulgare*, qualité nutritionnelle.

Abstract

Today, improving the nutritional quality of crops is a major challenge for food security. Among sustainable agronomic practices, the use of organic amendments such as compost and biochar is a promising alternative for enriching the soil while optimizing the quality of crop production. This study evaluates the impact of three increasing doses of biochar (B1 = 141.73 g/m², B2 = 236.22 g/m², B3 = 472.44 g/m²) and compost (C1 = 307.08 g/m², C2 = 614.17 g/m², C3 = 1228.34 g/m²) on the nutritional quality of barley (*Hordeum vulgare* L.). The analyses covered several parameters: ash content, starch, amylose, amylopectin, total sugars, reducing sugars and also organic carbon in the soil. The results show a significant increase in ash content (up to 3.12% with B3) compared with control plants. However, there was a decrease in all the remaining quality variables (starch, amylose and amylopectin, total and reducing sugars), with all values showing lower levels than the control. However, the contribution of biochar exceeded that of compost. In fact, biochar showed superiority in the content of total sugars (3.58%), reducing sugars (11.77%), starch (65.63%), amylose (13.12%) and amylopectin (52.51%) compared with compost, which respectively showed the following lower contents (3.47%), (11.71%), (65.49%), (13.09%) and (52.39%). On the other hand, the compost contribution was more decisive in terms of soil organic carbon. This parameter peaked at dose C3 (3.08%), confirming the cumulative effect of high doses.

Keywords: Biochar, compost, barley, *Hordeum vulgare*, organic amendments, nutritional quality.

ملخص

يمثل تحسين الجودة الغذائية للمحاصيل الآن تحدياً رئيسياً لضمان الأمن الغذائي. ومن بين الممارسات الزراعية المستدامة، يعد استخدام محسنات التربة العضوية مثل السماد العضوي (Compost) والفحم الحيوي (Biochar) بديلاً واعداً لإثراء التربة مع تحسين جودة إنتاج المحاصيل. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير ثلاث جرعات متزايدة من الفحم الحيوي = B1 (Biochar)(141,73جم/م²، B2 = 236.22جم/م²، B3 = 472.44جم/م² (والسماد العضوي = C1 (Compost)(307.08جم/م²، C2 = 614.17جم/م²، C3 = 1228.34جم/م²(على الجودة الغذائية الشعير *Hordeum vulgare* L.). وقد شملت التحاليل عدة مؤشرات :محتوى الرماد، والنشا، والأميلوز، والأميلوبكتين، والسكريات الكلية، والسكريات المختزلة، وكذلك الكربون العضوي في التربة .ظهرت النتائج ارتفاعًا ملحوظًا في محتوى الرماد (يصل إلى 3.12% مع الجرعة B3) مقارنة بالجرعة الشاهدة. ومع ذلك، كان هناك انخفاض في جميع متغيرات الجودة المتبقية (النشا، والأميلوز والأميلوبكتين، والسكريات الكلية والمختزلة)، حيث أظهرت جميع القيم مستويات أقل من القيم الشاهدة. ومع ذلك، تجاوزت مساهمة الفحم الحيوي مساهمة السماد العضوي. في الواقع، مع الفحم الحيوي كان هناك تفوق في محتوى السكريات الكلية (3.58%)، والسكريات المختزلة (11.77%)، والنشا (65.63%)، والأميلوز (13.12%)، والأميلوبكتين (52.51%) مقارنةً بالسماد العضوي الذي أظهر المحتويات الأقل التالية على التوالي (3.47%)، (11.71%)، (65.49%)، (13.09%)، (52.39%). من ناحية أخرى، كانت مساهمة السماد العضوي أكثر حسماً من حيث الكربون العضوي في التربة. بلغ هذا المتغير ذروته عند الجرعة(3.08%) C3 ، مما يؤكد التأثير التراكمي للجرعات العالية..

الكلمات المفتاحية :الفحم الحيوي ،السماد العضوي ، شعير، *Hordeum vulgare*، جودة غذائية.

Table Des Matières

Dédicace .....
Dédicace .....
Remerciements .....
Résumé i
Abstract ii
ملخص iii
Table Des Matières iv
Liste des abréviations vii
Liste des figures ix
Liste des tableaux x
Introduction 1
Chapitre 01 : Bibliographie 3
1. L'origine et l'historique de l'orge 3
1.1 Évolution agricole et impact culturel 3
2. Classification Botanique 4
3. Morphologie 4
3.1 Appareil végétatif 5
3.1.1 Le système aérien 5
3.1.2 Le système racinaire 5
3.1.3 Le système adventif (racines secondaires) 5
3.2 L ' Appareil reproducteur 5
4. Le cycle de développement 6
4.1 La phase végétative (30 à 60 jours) 6
4.2 Phase de reproduction (30 à 40 jours) 6
4.3 Phase de floraison et fécondation (5 à 10 jours) 7
4.4 Le développement du grain (15 à 25 jours) 7
4.5 Phase de remplissage du grain et maturation (20 à 30 jours) 7
5. Les exigences agro-économiques 8
5.1 Le sol 8
5.2 L'eau 8
5.3 La température 8
5.4 La photopériode 8
6. Composition et valeur nutritionnel de l'Orge 9
7. Usage et l'importance économique de l'Orge 10
7.1 Les principales utilisations de l'orge 10
7.2 Impact économiques 10

7.3 L'utilisation et l'importance de l'orge en Algérie 11
8. Généralité sur la fertilisation 11
9. Les différents types d'engrais 12
9.1 Les engrais organiques 12
9.1.1 Le fumier et compost et biochar 12
9.1.2 Les engrais verts 13
9.2 Les engrais inorganiques 13
10. Les techniques d'application d'engrais 14
10.1 Fertigation 14
10.2 Pulvérisation foliaire 14
11. Notion de qualité des grains de l 'Orge (*Hordeum Vulgare L*) 15
12. Effets des engrais sur la qualité alimentaire de l'orge 16
12.1 Impact des engrais azotés 16
12.2 Rôle du phosphore et du magnésium 16
12.3 Effets synergiques du zinc 16
13. Impact des engrais Sur l'environnement 17
13.1 Pollution des sols : 17
13.2 Pollution des eaux : 17
13.3 Pollution de l'air : 17
Chapitre 02 : Matériels et méthodes 18
1. Le matériel végétal utilisé 18
2. Les analyses réalisées 19
2.1 Dosage de carbone organique 19
2.2 2.1 Le taux des cendres 20
2.3 Dosage spectrophotométrique de l'amidon total l'amylose et l'amylopectine 20
2.3.1 2.2.1 Le dosage de l'amidon 20
2.3.2 Le dosage de l'amylopectine 21
2.4 Dosage spectrophotométrique des sucres totaux et des sucres réducteurs 21
2.4.1 Préparation des échantillons 21
2.4.2 Le dosage des sucres totaux 21
2.4.3 Le dosage des sucres réducteurs 21
3. Etude statistique 22
Chapitre 03: Résultats 23
3.1 Le carbone 23
3.2 Les cendres 25
3.3 L 'amidon 27
3.4 L 'amylopectine 29
3.5 L'amylose 31
3.6 Les sucres totaux 33

3.7 Les sucres réducteurs 35
Chapitre 4 : Discussions 37
Conclusion 42
Références bibliographiques 43
Annexes 51

Liste des abréviations

- **1N :** Solution normale à 1 normalité.
- **B :** Biochar.
- **C :** Compost.
- **C% :** Pourcentage de carbone organique.
- **CaCO3 :** Carbonate de calcium.
- **Ddl:** degrés de liberté.
- **DMSO :** Diméthylsulfoxyde.
- **DNS :** Acide 3,5-dinitrosalicylique.
- **EC :** Conductivité Électrique.
- **$FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$) :** Sel de Mohr
- **H_2SO_4 :** Acide sulfurique.
- **HCl :** Acide chlorhydrique.
- **K :** Potassium.
- **$K_2Cr_2O_7$:** dichromate de potassium
- **KOH :** Hydroxyde de potassium.
- **m^2 :** Mètre carré.
- **Mg :** milligramme
- **N:** L'azote.
- **N_2O:** Protoxyde d'azote.

- **Nm :** Nanomètre.
- **P:** Phosphore.
- pH **:** Potentiel Hydrogène.
- **R^2 :** Coefficient de corrélation.
- **SC :** La somme des carrés.
- **Sig :** Significativité.
- **T :** témoin

Liste des figures

Figure 1: Forme et composition de l'épillet de l'orge (The Book Worm, Sablons, n.d.)…….…….,6

Figure 2 : Cycle de vie de l'orge (Havryliuk Kharzhevska, 2019.)……7

Figure 3: Les trois engrais organiques: fumier(1) et compost (2) et biochar(3) (Edafotec , 2025)..... 13

Figure 4 : Effet moyen du traitement du biochar et compost sur la teneur du carbone dans le sol. 24

Figure 5 : Effet moyen des doses de traitement du biochar et compost sur la teneur du carbone dans le sol .. 25

Figure 6 Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des cendres dans le grain de *Hordeum vulgare* 26

Figure 7 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des cendres dans le grain de *Hordeum vulgare.* 27

Figure 8 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amidon des grains de *l' Hordeum vulgare* 28

Figure 9 Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amidon dans le grain de *Hordeum vulgare.* 29

Figure 10 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amylopectine des grains de *l ' Hordeum vulgare* 30

Figure 11: Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amylopectine dans le grain de l' *Hordeum vulgare.* 31

Figure 12 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amylose des grains de *l ' Hordeum vulgare* 32

Figure 13 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amylose dans le grain de *Hordeum vulgare.* 33

Figure 14: Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des sucres totaux dans le grain de *Hordeum vulgare* 34

Figure 15: Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des sucres totaux dans le grain de *Hordeum vulgare.* 34

Figure 16 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des sucres réducteurs des grains de *l ' Hordeum vulgare* 36

Figure 17 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des Sucres réducteurs dans le grain de *Hordeum vulgare.* 36

Figure 18 : Échantillons et solutions préparées pour le dosage du carbone organique dans le sol 51

Figure 19 : Spectrophotomètre..... 51

Figure 20 : Bain-marie 52

Figure 21 : Tubes à essai contenant les extraits d'orge avec les réactifs 52

Figure 22: La courbe d'étalonnage de l'amidon, l'amylopectine et l'amylose 53

Figure 23 : La courbe d'étalonnage des Sucre Totaux..... 53

Figure 24 : La courbe d'étalonnage de les Sucre Réducteur..... 54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification botanique de l'orge *Hordeum vulgare.L* 4
Tableau 2 : Composition et valeur nutritionnel de l'Orge. 9
Tableau 3: Doses de biochar et de compost utilisées dans les traitements expérimentaux 18
Tableau 4: Caractéristiques physicochimiques du sol, du biochar et du compost utilisés 19
Tableau 5: Analyse de la variance (ANOVA) des effets du traitement et de la dose sur les paramètres qualitatifs du grain d'orge. 23
Tableau 6 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Carbone » 54
Tableau 7 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur le carbone 55
Tableau 8 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur le carbone 55
Tableau 9 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Cendre » 55
Tableau 10 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les Cendre 55
Tableau 11 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur les Cendre 56
Tableau 12 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amidon » 56
Tableau 13: Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amidon 56
Tableau 14 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amidon 57
Tableau 15 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amylopectine » 57
Tableau 16 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amylopectine 57
Tableau 17 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amylopectine 58
Tableau 18 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amylose » 58
Tableau 19 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amylose 58
Tableau 20 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amylose 58
Tableau 21 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Sucre Totaux » 59
Tableau 22 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les sucres totaux 59
Tableau 23 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur les Sucre totaux 59
Tableau 24 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Sucre réducteur » 60
Tableau 25 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les Sucre réducteur 60
Tableau 26 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet dose (biochar, compost) sur les Sucre réducteur 60

Introduction

Introduction

L'orge (*Hordeum vulgare* L*)* est une céréale largement cultivée dans le monde, utilisée aussi bien pour l'alimentation humaine que pour l'alimentation animale et la production de bière. Elle est appréciée pour sa richesse en fibres, en vitamines du groupe B, en minéraux (magnésium, phosphore, fer et en composés bioactifs, qui contribuent à la santé cardiovasculaire et digestive.

La qualité nutritionnelle de l'orge dépend de nombreux facteurs, notamment les conditions de culture (Baik et Ulrich ,2008), la variété et les traitements post-récolte (Idehen et al., 2017). Il est natatoire que l'amélioration de la qualité alimentaire des plantes doit en premier passer par la restauration de leurs milieux de vie, essentiellement le sol (Lal, 2009). Plusieurs auteurs ont rapporté que l'amendement organique par le biochar et le compost est une stratégie à double tranche, en effet la fertilisation organique en corrigeant les paramètres physicochimiques du sol permet d'augmenter la production en améliorant aussi la qualité de l'aliment (Agegnehu et al.,2016). Parmi les amendements organiques les plus utilisés de nos jours dans la fertilisation on a le compost et le biochar.

Le biochar, un amendement organique obtenu par pyrolyse de biomasse, est reconnu pour son effet bénéfique sur la structure du sol et la disponibilité des nutriments (Lehmann et Joseph, 2009). Son utilisation a montré une amélioration de la composition minérale de plusieurs plantes céréalières (Farooq et al., 2018). De même, le compost, issu de la décomposition de matières organiques, est aussi une source riche en nutriments essentiels tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Il favorise également l'activité microbienne du sol, ce qui pourrait améliorer l'absorption des nutriments et la teneur en composés bioactifs des plantes (Adhikari et al., 2009) .Il faut dire que les agriculteurs en apportant ces fertilisants organiques ils visent en premier lieu le développement végétatif de la plante et son rendement en grain mais pas la qualité alimentaire du grain récolté. Aussi, les différents amendements organiques n'ont pas tous la même influence sur les fertilités physiques, chimiques et biologiques des sols.

Dans ce contexte, notre étude vise à évaluer l'impact de trois doses croissantes de biochar et du compost sur la qualité nutritionnelle de l'orge. On vise à mettre en relief comment ces deux fertilisants organiques influencent la composition nutritionnelle de l'orge. Par hypothèse on

s’attendra en premier lieu à une amélioration de la qualité alimentaire en présence des deux fertilisants en comparaison avec le traitement témoin, aussi la qualité alimentaire de l’orge s’améliora linéairement avec l’augmentation des doses apportés des deux fertilisants organiques et que les paramètres de qualité testés seront divergents pour les deux fertilisants.

Ce modeste mémoire est formé de ces parties suivantes :

- Chapitre 1 : bibliographie
- Chapitre 2 matériels et méthodes
- Chapitre 3 résultats
- Chapitre 4 discussions
- Conclusion et références

Chapitre 01 : Bibliographie

1. L’origine et l’historique de l’orge

L'orge, l'une des premières céréales cultivées, a une riche histoire enracinée dans le Croissant fertile, en particulier dans les actuels Irak et Iran. Sa domestication il y a environ 10 000 ans a marqué un changement significatif dans les pratiques agricoles humaines, conduisant au développement de divers produits alimentaires, dont la bière, qui a probablement été découverte lors de la fermentation accidentelle de céréales stockées. Ce contexte historique met en évidence l'importance de l'orge dans les premières sociétés et son héritage durable. L’orge est devenue un aliment de base aux côtés du blé. Des preuves archéologiques suggèrent que la culture de l'orge a commencé dès le 12ème millénaire avant notre ère, passant d'une source de nourriture complémentaire à une culture primaire (Ghahremaninejad et al., 2021).

1.1 Évolution agricole et impact culturel

Les conditions agronomiques du Proche-Orient ont facilité la croissance de l'orge, avec une disponibilité en eau favorable dans les temps anciens (Araus et al., 2014). Au fil des millénaires, l'orge domestiquée a présenté une augmentation du poids des grains, reflétant des pratiques de sélection sélectionnée (Araus et al., 2014 ; Dutta et al., 2018).

Malgré son importance historique, le statut de l'orge a diminué à mesure que d'autres céréales sont devenues plus répandues, ce qui a conduit à sa perception comme « le pain des pauvres » (Stanca et al ., 2016 ; Ghahremaninejad et al., 2021).Bien que le rôle de l'orge dans l'agriculture et la culture anciennes soit bien documenté, son déclin soulève des questions quant aux facteurs socioéconomiques qui influencent les préférences céréalières au fil du temps.

***En Algérie :**

L'évolution de l'orge en Algérie a été fortement influencée par des facteurs écologiques et des pratiques culturales, façonnant son rôle dans l'agriculture et la société locales. L'orge, en particulier *Hordeum vulgare*, s'est adaptée aux diverses conditions bioclimatiques du pays, présentant une riche diversité génétique essentielle à des pratiques agricoles durables. Cette adaptabilité est essentielle face aux défis que l'Algérie doit relever tels que le changement climatique et la pénurie d'eau, faisant de l'orge une culture stratégique pour la sécurité alimentaire.

-La diversité génétique de l'orge en Algérie est le résultat à la fois de la sélection naturelle et des pratiques culturales humaines, qui ont façonné ses variétés locales au fil du temps (Kumar et al., 2020).

-L'orge fait partie intégrante des régimes alimentaires algériens, souvent mélangée au blé pour améliorer sa valeur nutritionnelle et ses bienfaits pour la santé (Rahal-bouziane, 2016).

2. Classification Botanique

L'orge, connue scientifiquement sous le nom de *Hordeum vulgare*, appartient à la tribu des Triticées de la famille des Poacées. Ce genre comprend à la fois des espèces cultivées et des espèces sauvages, et plus de 30 espèces sauvages apparentées contribuent à sa diversité génétique. La classification de l'orge a évolué grâce à diverses études taxonomiques, ce qui a permis de mieux comprendre ses relations et ses sous-groupes .Les sections suivantes décrivent les principaux aspects de la classification botanique de l'orge (Blattner, 2018)

-Selon Emberger (1960), prats (1960) et Feillet (2000), l'orge cultivée est classée comme suit :

Tableau 1 : Classification botanique de l'orge *Hordeum vulgare*.L

Régné	Plantae
Division	Magnoliophyta
Classe	Liliopsida
S/Classe	Commelinidae
Ordre	Poale
Famille	Poaceae (ex Graminées)
S/Famille	Hordeoideae
Tribu	Hordeae (Hordées)
S/Tribu	Hordeinae
Genre	Hordeum
Espèce	*Hordeum vulgare* L

3. Morphologie

L'orge est une plante annuelle au cycle végétatif court, plantée en hiver ou au printemps et récoltée avant l'été. Le grain est de forme elliptique et de couleur noir ou pourpre. D'un point de vue morphologique le grain d'orge est un caryopse à glumelles adhérentes chez les variétés

cultivées. Les glumelles ou enveloppes ne se séparent pas du grain lors du battage (Andrew et al., 2017).

3.1 Appareil végétatif

3.1.1 Le système aérien

Est formé d'une tige cylindrique et creuse, entrecoupée de nœuds là où se forment les feuilles sa hauteur varie de 30 à 120 cm selon la variété et les conditions de culture.

3.1.2 Le système racinaire

Est composé de deux systèmes radiculaires successifs. Le système séminal ou racines primaires, seul fonctionnel de la levée au début du tallage. Ces racines sont d'origines embryonnaires. Ce système est constitué d'une racine principale et de deux paires de racines latérales, soit cinq racines éventuellement une sixième racine qui peut se développer ; Les racines de ce système sont au nombre de six, rarement sept Benlaribi et al., 1990 In (Hazmoune, 2006).

3.1.3 Le système adventif (racines secondaires)

Est un système de racines coronaires ou système de racines de tallage. Il se forme dès le tallage et se substitue parallèlement au système séminal. Il est de type fasciculé (Soltner, 2005).

3.2 L'appareil reproducteur

L'inflorescence est toujours en épi cylindrique de 5-10 cm de long, composée de groupes de 3 épillets disposés de façon alternée (Brink et Belay, 2006). Il est pointu ou porté à la tête du haut de la tige, avec des épillets attachés à des zigzags rachis : chaque épillet à deux glumes se terminant par une arête (Mukund, 2015). La fécondation est autogame (Brink et Belay, 2006)

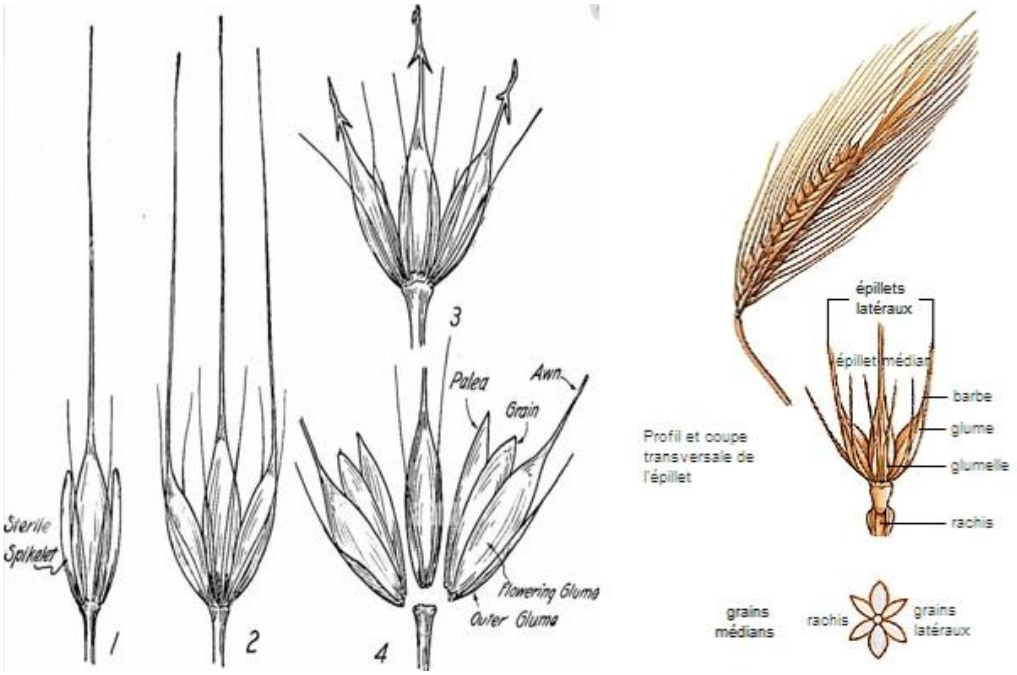


Figure 1: Forme et composition de l'épillet de l'orge (The Book Worm, Sablons, n.d.)

4. Le cycle de développement

Le cycle de développement de l'orge (*Hordeum vulgare* L) comprend plusieurs phases critiques influencées par des facteurs génétiques et environnementaux. Ce cycle peut être généralement classé en stades végétatif, reproducteur et de développement des grains, chacun étant caractérisé par des changements physiologiques et moléculaires distincts. Il est essentiel de comprendre ces phases pour optimiser la culture de l'orge et améliorer le rendement.

4.1 La phase végétative (30 à 60 jours)

Initiée dès la germination, cette phase comprend la levée des feuilles et le tallage, qui sont affectés de manière significative par la photopériode et la température. Des photopériodes plus longues raccourcissent généralement le cycle de croissance, tandis que les variations de température peuvent accélérer ou retarder le développement selon le génotype (Parrado et al., 2024).

4.2 Phase de reproduction (30 à 40 jours)

- Allongement de la tige et formation de l'épi, initiation des organes reproducteurs (INRAE, 2023).

4.3 Phase de floraison et fécondation (5 à 10 jours)

- Apparition des anthères et pollinisation, fécondation des ovules (INRAE, 2023).

4.4 Le développement du grain (15 à 25 jours)

Après la floraison, le grain passe par plusieurs étapes, dont des phases de préstockage et de stockage.

En revanche, alors que les facteurs environnementaux tels que la température et la photopériode sont essentiels, les facteurs génétiques jouent également un rôle important dans la détermination de l'efficacité et du moment du développement de l'orge, ce qui suggère une interaction complexe qui mérite une étude plus approfondie.

4.5 Phase de remplissage du grain et maturation (20 à 30 jours)

Accumulation des réserves dans le grain, maturation progressive jusqu'à la récolte

- -La durée totale du cycle dépend des conditions climatiques et de la variété d'orge cultivée. L'orge de printemps a un cycle plus court (environ 100-120 jours), tandis que l'orge d'hiver peut durer jusqu'à 180 jours (INRAE, 2023).

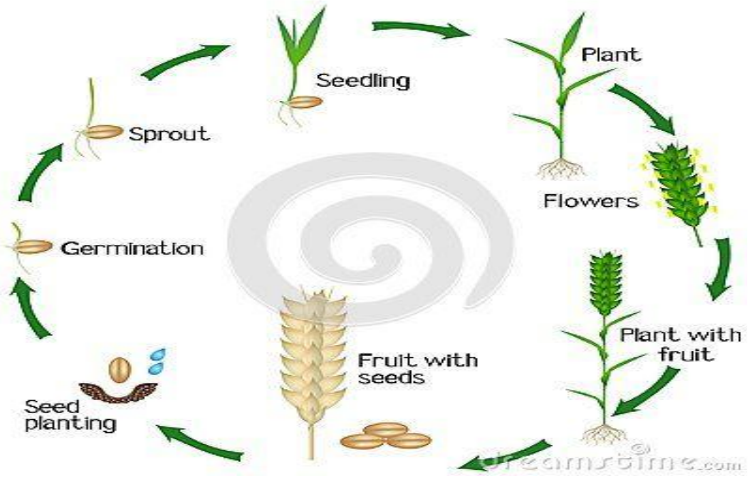


Figure 2 : Cycle de vie de l'orge (Havryliuk , 2019)

5. Les exigences agro-économiques

5.1 Le sol

L'orge tolère une large gamme de sols, assez diversifiée. Cependant, les sols les plus adaptés semblent être des sols profonds neutres à texture équilibrée (El Mourid et al., 1992 ; Boulal et al., 2007). Les sols légers, calcaires ou siliceux sont bien adaptés, alors que les sols lourds, humides et tourbeux ne le sont pas (Gronde et Jussiaux, 1980).

5.2 L'eau

Les besoins moyens en eau de l'orge au cours de son cycle de développement sont respectivement de 450 à 550 mm. Ses besoins en eau sont élevés en début de cycle, mais du fait du cycle court. La quantité d'eau disponible pour le stockage en hiver ne garantit souvent pas une croissance satisfaisante des plantes tout au long de l'année ; ainsi, les terres sont laissées en jachère en été pour permettre une restauration profonde de l'humidité .La sècheresse retarde souvent les stades de développement des plantes en raison de l'inhibition de la croissance due au manque d'eau (Blum, 1996 ; Hargas, 2007). En l'absence d'humidité suffisante, les graines ne se développeront pas et l'émergence de la culture sera retardée. Toutefois, l'orge tolère la sècheresse en fin de cycle (Tambussi et al., 2005 ; Boulal et al., 2007).

5.3 La température

Selon SIMONE et al (1989), le zéro de germination pour l'orge est de 0°C p. L'orge tolère le froid plus que le blé. Le seuil thermique de mortalité varie entre -12 et -16°C selon la sensibilité de la variété Entz et Fowler, 1988 in (Boulalet al., 2007). Les basses températures de l'ordre de 5°C empêchent l'émergence de la lame qui se déforme alors (Gate, I 1995). Des températures élevées supérieures à 28°C, pendant la maturation des grains se traduisent par l'échaudage physiologique (Giban, 2001).

5.4 La photopériode

L'orge est une plante adaptée aux jours longs (donc sa floraison est rapide en jours longs). Elle nécessite une durée d'éclairage d'environ 12 heures pour que l'épi commence à monter dans les tiges (Simon et al., 1989 ; Boulal et al., 2007). La durée d'une journée sans évolution est d'environ 6 à 7 heures. D'autre part, une photopériode d'environ 16 à 18 heures par jour permet une croissance plus rapide (Gate et Gian, 2003).

6. Composition et valeur nutritionnel de l'Orge

L'orge (*Hordeum vulgare*) est une céréale riche en nutriments reconnue pour sa composition diversifiée et ses bienfaits pour la santé. Il se compose principalement de glucides complexes, de protéines, de lipides et de composés bioactifs, ce qui en fait un complément précieux à divers régimes alimentaires. Les sections suivantes détaillent sa composition et sa valeur nutritionnelle.

Tableau 2 : Composition et valeur nutritionnel de l'Orge.

Compositions	**Valeur nutritionnelle**
Glucides	69,5 % à 82,5 % une source d'énergie importante (Yiblet et al. 2024).
Protéines	11,5 % à 14,2 % (Alshamlan, 2023 ; Kaur et al. 2024)
Lipides	4,7 % à 6,8 % (Romanova et al. 2023 ; Kaur et al. 2024)
Fibres	riche en fibres alimentaires (β-glucanes) qui peuvent amélio taux de cholestérol et favoriser la santé digestive (Raj et al. 202
Teneur en minérau	(Yiblet et al. 2024)
Calcium	310 à 670 mg/100 g
Fer	34,9 à 65 mg/100 g
Zinc	8,9 à 16 mg/100 g
Magnésium	520 à 122 mg/100 g.
Composés bioactifs	(Raj et al. 2023 ; Yiblet et al. 2024)
composés phénoliques	1,2 à 3,1 mg/100 g
Flavonoïdes	0,41 à 0,55 mg/100

Remarque : l'avantage pour la santé et les précautions à prendre

L'orge offre une série d'avantages pour la santé, notamment la réduction du cholestérol l'amélioration de la digestion, la gestion du poids, en plus de ses propriétés antioxydants et antiinflammatoires (Raj et al., 2023).Malgré ses nombreux avantages, il est important de noter que l'orge contient du gluten, ce qui en fait un aliment à éviter pour les personnes souffrant de la maladie céliaque ou d'une sensibilité au gluten. Pour les personnes sans sensibilité au gluten, l'orge reste un aliment extrêmement nutritif et polyvalent à intégrer dans de nombreux types de régimes alimentaires.

7. Usage et l'importance économique de l'Orge

L'orge *(Hordeum vulgare* L.) est une céréale vitale qui revêt une importance économique significative à l'échelle mondiale, se classant au quatrième rang des producteurs après le blé, le riz et le maïs. Il sert à de multiples fins, notamment l'alimentation du bétail, l'alimentation humaine et la production de malt pour le brassage. La capacité d'adaptation de la culture à des environnements marginaux la rend cruciale pour la sécurité alimentaire, en particulier pour les agriculteurs les plus pauvres.

7.1 Les principales utilisations de l'orge

- **Alimentation animale :** La plus grande partie de la production d'orge est utilisée pour l'alimentation du bétail, fournissant des nutriments essentiels et des protéines qui surpassent ceux présents dans le maïs ou le blé (Barley ,2023)

- **Maltage et brassage :** L'orge est principalement maltée pour la production de bière et de spiritueux, ce qui en fait le secteur le plus lucratif (Langridge, 2018 ; Barley, 2023)

- **Consommation humaine** : L'orge est également consommée directement comme aliment, riche en fibres alimentaires et en nutriments essentiels, ce qui contribue aux bienfaits pour la santé (Al-Khayri et al., 2019).

- **Agriculture durable** : En rotation des cultures, l'orge contribue à améliorer la structure du sol et à réduire les maladies et les mauvaises herbes. (Barley, 2023)

7.2 Impact économiques

- **Production mondiale** : La production d'orge dépasse 150 millions de tonnes métriques par an, cultivée sur 51 millions d'hectares, ce qui met en évidence son ampleur économique. (Kumari et al., 2024), (Barley. 2023)

- **Recherche et développement** : L'orge sert d'organisme modèle dans la recherche génétique et agricole, influençant les progrès de la pyrotechnique (Langridge, 2018 ; Al-Khayri et al., 2019)

- **Industrie brassicole:** L'industrie de la bière représente une part importante de la demande mondiale d'orge, créant des chaines de valeur importantes pour les agriculteurs,

les malteries et les brasseries. L'Europe est un acteur majeur dans ce secteur, notamment grâce à ses traditions brassicoles.

- **Résilience climatique :** L'orge est adaptée aux climats plus secs et aux sols moins fertiles, ce qui en fait une culture stratégique dans un contexte de changement climatique. Sa résilience favorise les économies agricoles dans les régions arides (Barley, 2011)

Contribution au PIB agricole: Dans certains pays, l'orge contribue de manière significative au PIB agricole. Par exemple, en Australie et au Canada, elle joue un rôle clé dans les exportations céréalières (FAO, 2021).Malgré son importance historique et son utilité actuelle, la production d'orge a stagné par rapport à celle des autres céréales, ce qui soulève des inquiétudes quant à son rôle futur dans l'agriculture mondiale (Langridge, 2018).

7.3 L'utilisation et l'importance de l'orge en Algérie

L'orge est une culture essentielle en Algérie, principalement utilisée comme fourrage pour le bétail et dans certains produits alimentaires traditionnels. Adaptée aux conditions climatiques semi-arides, elle joue un rôle clé dans les zones rurales, offrant une alternative face aux difficultés liées à la culture du blé. Sa production, estimée à 2,5 millions de tonnes pour environ 1,2 million d'hectares, rencontre néanmoins des défis tels que la gestion de l'eau, les maladies des plantes et les infrastructures agricoles insuffisantes. Malgré ces obstacles, l'orge présente un fort potentiel de développement économique, surtout avec des politiques agricoles adaptées et une meilleure gestion des ressources (Rahal-Bouziane et Hafida, 2015 ; Amar Malki, 2024).

8. Généralité sur la fertilisation

La fertilisation constitue une pratique essentielle en agriculture, visant à améliorer la productivité des cultures et à optimiser leur qualité nutritionnelle. Elle permet de combler les déficits en nutriments présents dans le sol, essentiels à la croissance des plantes, en particulier l'azote (N), le phosphore (P) et le potassium (K). Ces éléments sont nécessaires à la photosynthèse, à la formation des protéines et des racines, ainsi qu'à la résistance aux stress biotiques et abiotiques (Moughli, 2000).

- La fertilisation peut être classée en deux catégories principales: organique et minérale. Les fertilisants organiques, tels que le fumier et le compost, enrichissent le sol en matière

organique, améliorant ainsi sa structure et sa capacité de rétention d'eau. À l'inverse, les fertilisants minéraux, principalement d'origine chimique, apportent rapidement les nutriments essentiels, mais doivent être utilisés avec précaution pour éviter les risques de pollution de l'environnement et la dégradation des sols. Une gestion adéquate de la fertilisation permet non seulement de garantir une disponibilité suffisante des éléments nutritifs pour les plantes, mais aussi de préserver la fertilité à long terme du sol (Gwang et al., 2000).

- Toutefois, l'utilisation excessive ou mal gérée des engrais, notamment les engrais azotés, peut entrainer des effets négatifs sur l'environnement, tels que l'eutrophisation des eaux et la pollution des nappes phréatiques. Par conséquent, une approche durable de la fertilisation, incluant la fertilisation de précision et l'utilisation de fertilisants organiques, est essentielle pour maintenir un équilibre entre la productivité agricole et la protection de l'environnement (FAO, 2003 ; Gherairia et Zardoudi, 2018). Cette gestion doit s'appuyer sur une connaissance approfondie des besoins nutritionnels des cultures et des caractéristiques spécifiques des sols, afin de garantir des rendements élevés tout en minimisant les impacts écologiques (Singh et al., 2020).

9. Les différents types d'engrais

Les engrais se divisent principalement en deux grandes catégories**:** les engrais organiques et les engrais inorganiques. En fonction de leur composition, leur origine, et leur mode d'action, d'autres sous-catégories peuvent être distinguées.

9.1 Les engrais organiques

Les engrais organiques proviennent de sources naturelles, souvent végétales ou animales, et sont utilisés pour améliorer la fertilité du sol tout en préservant l'environnement.

9.1.1 Le fumier et compost et biochar

- Le fumier est obtenu par fermentation des excréments et de la litière des animaux.
- Le compost est le résultat de la décomposition contrôlée des matières organiques comme les déchets alimentaires et végétaux Le biochar est un matériau riche en carbone produit par la pyrolyse de matières organiques telles que les résidus agricoles, les déchets forestiers et les

déchets municipaux. Il est reconnu pour sa structure poreuse, sa grande capacité d'échange cationique et son pH alcalin, ce qui en fait un outil efficace pour le nettoyage et l'amélioration des sols (Borthakur et al., 2019).



Figure 3: Les trois engrais organiques: fumier(1) et compost (2) et biochar(3) (Edafotec , 2025)

9.1.2 Les engrais verts

Ces engrais sont des cultures à croissance rapide, enfouies sur place pour enrichir le sol en matière organique et en éléments nutritifs, notamment en azote. Les algues marines, par exemple, sont utilisées depuis des siècles comme amendement pour améliorer la structure et la fertilité des sols (Muthezhilan et al., 2014).

9.2 Les engrais inorganiques

Les engrais inorganiques, ou chimiques, sont fabriqués à partir de sources minérales naturelles ou de procédés industriels. Ils apportent des éléments essentiels à la croissance des plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium. Ils sont souvent conçus pour répondre aux besoins spécifiques des cultures grâce à une libération rapide ou contrôlée des nutriments.

Les engrais peuvent être classés en plusieurs catégories selon leur composition et leur mode d'action. Les engrais simples contiennent un seul élément nutritif essentiel. Parmi eux, les engrais azotés (N) favorisent la croissance végétative des plantes, les engrais phosphatés (P) stimulent le développement racinaire, tandis que les engrais potassiques (K) améliorent la résistance des cultures et la qualité des récoltes (FAO, 2005). En revanche, les engrais composés associent au

moins deux éléments nutritifs majeurs, sous forme d'engrais binaires (NK, NP, PK) ou ternaires (NPK), afin d'assurer un équilibre nutritionnel optimal pour les cultures (He et al., 2017). Une autre catégorie, les engrais complexes, est obtenue par des procédés chimiques, où chaque grain contient plusieurs éléments nutritifs, garantissant ainsi une distribution homogène des nutriments. Enfin, les engrais gazeux, principalement utilisés en agriculture sous serre, libèrent du dioxyde de carbone (CO_2), un élément essentiel qui améliore la photosynthèse et stimule la croissance des cultures (Niu, 2002).

10. Les techniques d'application d'engrais

Les engrais peuvent être appliqués de différentes manières, notamment par incorporation directe dans le sol, par pulvérisation foliaire ou via l'irrigation, méthode connue sous le nom de fertigation. L'application au sol reste la méthode la plus courante, car la plupart des engrais sont conçus pour être suffisamment solubles dans l'humidité du sol, permettant ainsi une absorption optimale par les plantes.

10.1Fertigation

La fertigation consiste à appliquer des engrais à travers le système d'irrigation en utilisant des produits fertilisants solides solubles ou des solutions liquides. Pour garantir une efficacité maximale et éviter des problèmes techniques tels que l'obstruction du système d'irrigation, les fertilisants utilisés doivent répondre aux critères suivants (Miller & Miller, 2013) :

- **Haute solubilité dans l'eau** : Permet une dissolution rapide et homogène.
- **Pureté de la solution fertilisante** : Les impuretés, qu'elles proviennent des produits utilisés ou de leurs réactions, peuvent causer l'obstruction des tuyaux, goutteurs ou émetteurs, aggravée par la présence d'algues ou de microorganismes dans l'eau d'irrigation.
- **Compatibilité des produits** : Les fertilisants combinés doivent éviter la formation de composés insolubles qui pourraient altérer l'efficacité du système.

10.2 Pulvérisation foliaire

Cette méthode consiste à appliquer directement des engrais sur le feuillage pour corriger rapidement des carences nutritionnelles aiguës, notamment en azote ou en oligo-éléments. Cependant, des précautions doivent être prises:

- Utiliser des concentrations faibles pour éviter les brulures foliaires.
- Employer de l'urée contenant moins de 2% de biurets (composés secondaires produits lors de la fabrication de l'urée, connus pour leur toxicité envers les plantes) afin de limiter les dommages (Fageria et al., 2009)

Ces méthodes, bien que complémentaires, doivent être choisies en fonction des besoins spécifiques des cultures, des conditions environnementales et des ressources disponibles pour garantir une fertilisation efficace et durable (Finck, 1982; FAO, 2003; Kaur, 2016).

11. Notion de qualité des grains de l 'Orge (*Hordeum Vulgare* L)

Les grains d'orge (*Hordeum vulgare* L) possèdent une qualité nutritionnelle remarquable, influençant leur utilisation en alimentation humaine et animale. Ils sont principalement constitués de **glucides (60-70 %)**, dont la majorité sous forme d'**amidon** (61,59 g/100 g), essentiel pour l'industrie de la brasserie et comme source d'énergie pour les animaux (Zhu, 2017). Une petite proportion de **sucres simples** (1,71 g/100 g) est également présente, jouant un rôle dans la digestibilité. L'orge est également une source intéressante de **protéines (8-15 %)**, avec un apport moyen de **11,20 g/100 g**, bien que sa teneur en lysine, un acide aminé essentiel, soit limitée. Son profil lipidique est modeste (**2-3 %**), mais il apporte des **acides gras essentiels**, notamment **1150 mg d'acide linoléique** et **110 mg d'acide alpha-linolénique** pour 100 g. En parallèle, sa richesse en **fibres alimentaires (10-20 %)**, dont les **β-glucanes** (4-7 %), contribue à la régulation du cholestérol et au contrôle de la glycémie, tandis que la lignine et la cellulose influencent la digestibilité des grains destinés à l'alimentation animale (Geng et al., 2022).

L'orge contient également divers **micronutriments**, essentiels au bon fonctionnement de l'organisme. Les **cendres (2-3 %)** représentent la fraction minérale du grain, apportant des éléments clés comme le **phosphore**, indispensable au métabolisme énergétique, le **potassium**, régulant l'équilibre hydrique, ainsi que le **magnésium, le zinc et le fer**, bien que leur biodisponibilité puisse être limitée par la présence de **phytates**. L'orge est également une source de **vitamines du groupe B (B1, B2, B3, B6)**, essentielles pour le métabolisme énergétique, et de **vitamine E**, un puissant antioxydant. Cependant, la présence de **facteurs antinutritionnels** comme les **tannins** (dans certaines variétés à grains colorés) et les **mycotoxines** (contaminants fongiques) peut affecter sa digestibilité et sa qualité sanitaire. L'amélioration des conditions de

culture et des techniques de transformation permet d'optimiser la valeur nutritionnelle de l'orge et de garantir un produit de haute qualité pour différentes industries agroalimentaires (Farag et al., 2020).

12. Effets des engrais sur la qualité alimentaire de l'orge

L'application d'engrais influence de manière significative la qualité nutritionnelle de l'orge, notamment en termes de teneur en protéines, de poids des grains et de rendement global. Diverses études indiquent que les engrais azotés et phosphorés améliorent ces paramètres de qualité, des combinaisons spécifiques donnant des résultats optimaux.

12.1Impact des engrais azotés

L'azote est essentiel à la croissance de l'orge, car il influe sur la teneur en protéines et le rendement global. Des doses d'application de 60 à 90 kg/ha ont montré une augmentation des taux de protéines, la teneur en protéines la plus élevée étant enregistrée à 10,8 % lorsqu'ils sont combinés à des engrais organiques (Kumar, 2021 ; Chavarekar et al., 2013).

12.2Rôle du phosphore et du magnésium

L'ajout d'engrais à base de magnésium augmente encore la teneur en protéines de 1,2 % par rapport aux engrais azotés et potassiques (Bizhan, 2023).

12.3Effets synergiques du zinc

L'incorporation de zinc à des engrais azotés améliore non seulement l'efficacité de l'utilisation de l'azote, mais augmente également la teneur en protéines des grains d'orge. Une faible dose de zinc (5 kg/ha) était suffisante pour augmenter les niveaux de protéines tout en permettant une application réduite d'azote (Gonzalez et al., 2019).

Bien que les engrais améliorent généralement la qualité nutritionnelle de l'orge, une application excessive peut entrainer une diminution des rendements, ce qui nécessite une gestion minutieuse pour optimiser à la fois le rendement et la qualité.

13. Impact des engrais Sur l'environnement

L'utilisation des engrais, bien que fondamentale pour l'augmentation des rendements agricoles, engendre des effets complexes sur le sol et l'environnement, qui dépendent fortement de leur nature, de leur dosage et des pratiques agricoles.

13.1Pollution des sols :

- Contamination par des métaux lourds toxiques, comme le cadmium.

13.2Pollution des eaux :

- Ruissèlement des nitrates et phosphates causant l'eutrophisation des cours d'eau et la perte de biodiversité aquatique.
- Contamination des eaux souterraines, affectant leur potabilité.

13.3Pollution de l'air :

- Émissions de gaz à effet de serre (protoxyde d'azote - N_2O) dues à la dénitrification et la volatilisation de l'ammoniac.
- Contribution significative au réchauffement climatique (Behera et al., 2013).

Chapitre 02 : Matériels et méthodes

Le travail a été réalisé au niveau du laboratoire des êtres vivants au niveau de la faculté Des Sciences de la Nature et de la vie à l'Université Echahid cheikh Larbi Tebessi(Tébessa) au cours de l'année 2024-2025.

1. Le matériel végétal utilisé

Le matériel utilisé consiste en une mouture de graines obtenue d'un essai réalisé dans le cadre d'un doctorat au cours de l'année 2023-2024. L'expérimentation consistait à semer des grains d'orge dans des parcelles de sol (Surface $1m^2$) amendées avec des doses croissantes de biochar, compost, selon le tableau suivant :

Tableau 1: Doses de biochar et de compost utilisées dans les traitements expérimentaux

Traitement	Les doses utilisées			
Biochar	B1=141,73g/ m^2	B2=236,22 g/ m^2	B3= 472,44 g/ m^2	Témoin
Compost	C1= 307,08 g/ m^2	C2=614,173 g/ m^2	C3=1228,34g/ m^2	0 g/m^2

Pour la réalisation de notre modeste étude on a prélevé les grains obtenus pour déterminer les paramètres de qualité (taux de cendres, amidon, amylose, amylopectine, sucres totaux, sucres réducteurs et aussi le carbone organique dans le sol**)**, pour chaque paramètre l'essai est réalisé en Cinque répétitions (l'ensemble 35 répétition).

Les grains d'orge récoltés obtenues à la fin de l'expérimentation ont servi à réaliser cette modeste étude dont l'objectif était de mettre en relief l'effet de ces amendements sur la qualité alimentaire des grains récoltés des plantes traitées.

Pour ce faire, les grains prélevés et ont été broyés à l'aide d'un mortier en premier puis d'un broyeur électrique jusqu'à l'obtention d'une poudre fine, afin de réaliser les différentes analyses. Au déduit de l'expérimentation le sol et le compost ainsi que le biochar ont subi une analyse caractéristique, les résultats figurent dans le tableau 4

Tableau 2: Caractéristiques physicochimiques du sol, du biochar et du compost utilisés

Paramètres	Unité	Sol	Biochar	Compost
sable	(%)	58,10	–	-
limon	(%)	24,65	–	-
argile	(%)	17,25	–	-
pH	–	7,52 ±0,67	8,96 ±0,73	7,81
EC	(µS/cm)	188 ±41	1320 ±192	1071,40
Matière organique	(%)	2,311 ±0,106	10,00 ±0,25	13,48
CaCO3 total	(%)	21 ±0,05	14,34 ±1,87	-
CaCO3 actif	(%)	6,12 ±0,02	4,66 ±0,45	-

2. Les analyses réalisées

2.1 Dosage de carbone organique

Le dosage du carbone organique a été réalisé selon la méthode d'Anne (1945)**,** basée sur l'oxydation du carbone organique par le bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en milieu acide, suivie d'un titrage avec le sel de Mohr ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$).

Un échantillon de 0,2 g de sol est placé dans un ballon, puis on ajoute 10 ml de $K_2Cr_2O_7$ à 8 % et 15 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) concentré. Après chauffage, le mélange est dilué avec de l'eau distillée jusqu'à 250 ml et laissé au repos pendant 30 min.

Ensuite, 50 ml du surnageant ont été prélevés et titré avec une solution de sel de Mohr ($FeSO_4 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 6H_2O$), en présence de diphénylamine sulfonate comme indicateur. Le volume consommé permet de calculer le pourcentage de carbone organique, puis celui de matière organique, selon les formules appropriées.

$$\mathbf{C\%} = (V' - V/P)*100$$

- C% : pourcentage de carbone organique
- V' : volume de témoin
- V : volume de l'échantillon
- P : poids du sol

2.2 2.1 Le taux des cendres

- **Le mode opératoire**

L'échantillon broyés d'orge mis dans des creusets en porcelaine (nettoyés et séchés et pesés préalablement), pour chaque traitement des échantillons de (2g) sont calciné dans un four à moufle à 550°C pendant 4 heures. Une fois la combustion terminée, les creusets sont soigneusement retirés à l'aide de pinces, refroidis dans un dessiccateur, puis pesés de nouveau (CIBE, 2018). Chaque analyse est reproduite en cinq répétitions.

Le taux de cendre est calculé selon la formule :

$$\{\text{Taux de cendre (\%)}\} = (P_2 - P_0)/ (P_1 - P_0) *100$$

- P0 = Masse du creuset vide (g)
- P1 = Masse du creuset + échantillon avant incinération (g)
- P2 = Masse du creuset + cendres après incinération (g)

2.3 Dosage spectrophotométrique de l'amidon total l'amylose et l'amylopectine

2.3.1 2.2.1 Le dosage de l'amidon

- **Le mode opératoire**

Le dosage de l'amidon est réalisé par spectrophotométrie en utilisant pour chaque niveau de traitement cinq répétitions. Pour ce faire 0,1 g de farine de matériel biologique (finement broyé) est mélangé avec 5 ml de KOH 1N. La solution est bien homogénéisée à température ambiante, puis neutralisée avec 5 ml de HCl 1N. Le pH est vérifié à l'aide d'un papier pH pour s'assurer de la neutralité. Le mélange est ensuite porté à ébullition au bain-marie pendant 15 minutes, puis son volume est ajusté à 10 ml. Après centrifugation sur le surnageant récupéré on détermine la densité optique en faisant une lecture spectrale à une longueur d'onde 580 nm. La teneur de l'amidon est déduite à partir de la courbe d 'étalonnage suivante :

$$y = 0,0099x – 0,0654$$

2.3.2 Le dosage de l'amylopectine

Les mêmes échantillons utilisés pour le dosage de l'amidon sont par la suite lus à une longueur d'onde 720 nm pour déterminer la teneur de la mouture en amylopectine. La teneur de l'amylopectine est déduite à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$y = 0{,}0072x - 0{,}122$$

Remarque L'amylose représente 20% de l'amidon existant dans le grain, cette variable est déduite à partir des teneurs de l'amidon obtenus du calcul

2.4 Dosage spectrophotométrique des sucres totaux et des sucres réducteurs

2.4.1 Préparation des échantillons

1 g de la farine de chaque échantillon est dispersé dans 10 ml de DMSO à 25 % (v/v). Le mélange est ensuite incubé dans un bain-marie bouillant pendant 15 minutes afin d'extraire les sucres. Après incubation, 0,1 ml du mélange est dilué dans 9,9 ml d'eau distillée pour obtenir une solution homogène prête à être analyser.

2.4.2 Le dosage des sucres totaux

0,5 ml de la solution diluée de DMSO est prélevée, on y ajoute 0,5 ml de phénol (à 5 %), après homogénéisation, 2 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 75 % sont ajoutés au mélange. Après agitation, le mélange est incubé au bain mari. L'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde 500 nm. La teneur des sucres totaux est déduite à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$y = 0{,}0004x + 0{,}1381$$

2.4.3 Le dosage des sucres réducteurs

De la même façon comme pour les sucres totaux la détermination des sucres réducteurs est faite par une dispersion de 0,1 ml de la solution préparée DMSO auxquelles on ajoute 0,4 ml d'eau distillée**.** Ensuite 1 ml de DNS(Dinitrosalycylique). L'absorbance est mesurée après incubation à une longueur d 'onde (546 nm), l'essai est effectué aussi comme pour le cas des sucres totaux en

cinq répétitions La teneur des sucres réducteurs est déduite à partir de la courbe d ‘étalonnage suivante:

$$y = 0{,}001x + 0{,}1168$$

3. Etude statistique

Tous les résultats obtenus ont été soumis à une analyse statistique ANOVA (en prenant en compte deux facteurs dose et traitement). Les différences entre les résultats ont été considérées comme significatives pour une valeur de ($P < 0{,}05$). L'analyse statistique a été complétée par le test post-hoc de Tukey (HSD), qui a été appliqué pour effectuer des comparaisons multiples entre les moyennes des doses de biochar, et aussi les doses de compost en incluant les interactions entre les deux facteurs amendement et doses appliquée. Le logiciel utilisé est Statistica 13.0.

Chapitre 3 : Résultats

3.1. Le carbone

L'analyse de la variance des résultats obtenus pour le carbone dans le sol, montrent que l'effet dose est hautement significatif (p<0,001), de même que pour l'interaction dose x traitement e (p<0,001). Cependant le traitement par les deux fumures ne révèle aucun effet (p>0 ,05) (Tableau 5).

La comparaison multiple des moyennes selon le test de Tukey indique pour le biochar la valeur (2,04 ±0,26%), cette valeur est classée dans un même groupe avec celle du compost (2,26 ± 0,17%) (Figure 4)

Il est visible que la teneur moyenne du carbone s'améliore surtout avec la dose 4 la valeur obtenue est de (2,83± 0,005%), cependant le témoin annonce (2,20±0,003%), la dose 3 et la dose 2 révèlent respectivement (1,83± 0,001%) et (1,72±0,001%). A cet effet le test le Tukey met en relief ces deux groupes : D3> témoin, D2, D1

L'analyse statistique a mis en évidence une interaction significative entre les types de traitements et les doses appliquées, révélant trois groupes distincts en termes de teneur en carbone qui selon l'ordre suivant : C3 , B3 ,B2 > B3 , B2 , C1 , > B2 , C1 , T , B1 , C2

Ces résultats montrent que la dose C3 (3,08 ±0,007%) est la dose la plus efficace suivi par la dose B3 (2,58± 0,003%). La plus faible teneur (1,37± 0,002%) est allouée à la dose C2 du compost (Figure 5).

Tableau 1: Analyse de la variance (ANOVA) des effets du traitement et de la dose sur les paramètres qualitatifs du grain d'orge.

Facteurs	**ddl**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**
		Amidon				Amylopectine			Amylose	
Traitement	1	0,1	<0,001	***	0,04	<0,001	***	0,003	<0,001	***
Dose	3	0,1	<0,001	***	0,04	<0,001	***	0,002	<0,001	***
Interactions	3	0,0	<0,001	***	0,02	<0,001	***	0,001	<0,001	***
Errer	24	0,0			0,01			0,001		
Facteurs	**ddl**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**	**SC**	**Valeur-p**	**Sig**
		Cendre				Sucre totaux			Sucre réducteur	
Traitement	1	1,32	<0,001	***	0,014	<0,05	*	0,002	<0,05	*
Dose	3	0,52	<0,05	*	0,016	>0,05	NS	0,010	<0,001	***
Interactions	3	0,52	<0,05	*	0,010	>0,05	NS	0,001	>0,05	NS
Errer	24	1,06			0,074			0,009		

Facteurs	ddl	SC	Valeur-p	Sig
	Carbone			
Traitement	1	0,28	>0,05	NS
Dose	3	4,48	<0,001	***
Interactions	3	2,81	<0,001	***
Errer	16	1,68		

Ddl: degrés de liberté, **SC** : somme des carrés, **Sig** : Signification statistique,

*** : p<0,001 hautement significatif, ** : p<0,01 significatif,* : p<0,05 significatif, NS : p>0,05 Non significatif.

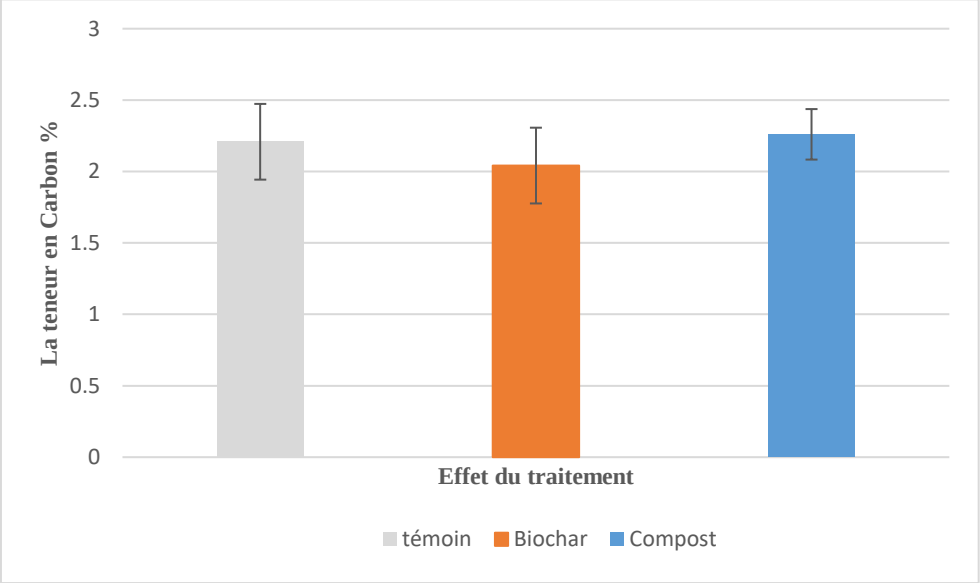


Figure 1 : Effet moyen du traitement du biochar et compost sur la teneur du carbone dans le sol.

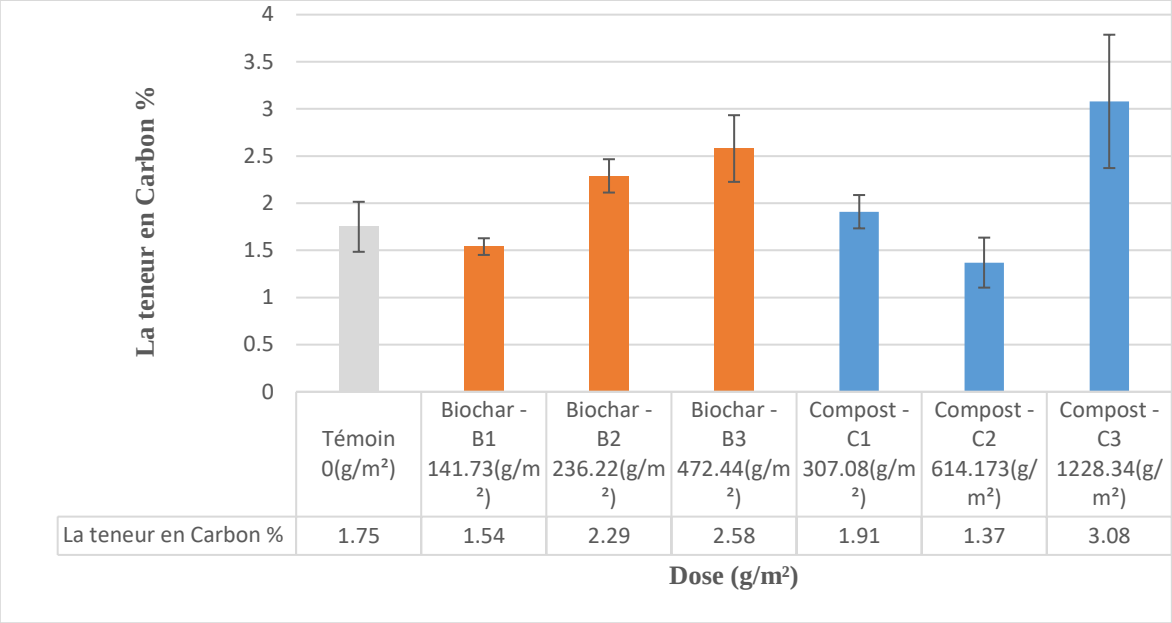


Figure 2 : Effet moyen des doses de traitement du biochar et compost sur la teneur du carbone dans le sol

3.2.Les cendres

L'analyse des résultats révèle une distinction marquée entre les niveaux de traitements, cette différence, statistiquement significative, tend à démontrer que la plante réagit favorablement à une fertilisation enrichie en biochar et aussi en compost, traduisant ainsi une amélioration dans la teneur des cendres en comparaison avec la plante témoin.

L'analyse de la variance des résultats obtenus montre un effet traitement hautement significatif ($p<0,001$). L'effet dose et aussi l'interaction dose x traitement sont significatifs ($p<0,0001$) (Tableau 5).

Le test de Tukey a noté pour le traitement deux groupes différents ce qui a permis de mieux appréhender la différence entre les deux fertilisants. En effet, le biochar (2,91 ±0,70 %) a montré une meilleure efficacité que le compost (2,50 ±0,35%) sur la teneur des cendres (Figure 6).

Concernant les doses appliquées le témoin apporte la plus faible teneur (2,50±0,03%), cependant la plus haute valeur est allouée à la dose D3 (2,81 ±0,04%).A cet effet les groups obtenus sont: D3, D2, D1>D1, T

L'interaction significative obtenue entre les traitements et les doses appliquées révèle les groupes suivants : B3, B1, B2>B1, B2, C2>C2, C3, T, C1. À cet effet l'apport du biochar en cendre dépasse celui du compost.

La proportion des cendres augmente linéairement avec l 'augmentation des doses. Les doses B3 et B1 révèlent les plus fortes moyennes respectives (3,12± 0,04%) et (3,00±0,04) alors que la dose C1 note la plus faible valeur (2,37 ±0,04%) (Figure 7)

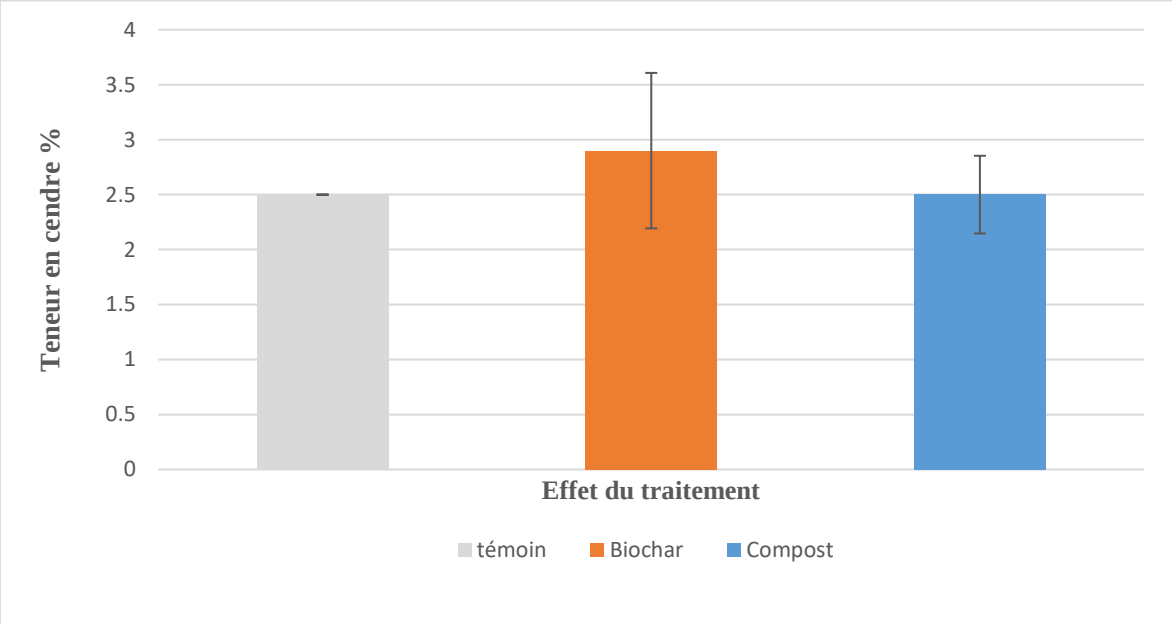
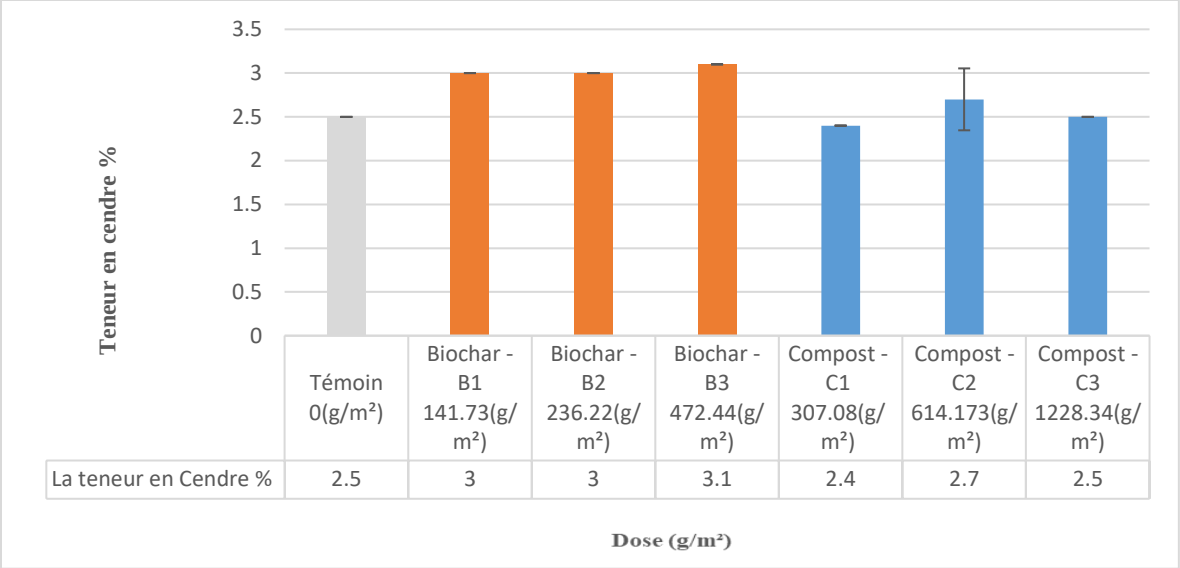


Figure 3 Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des cendres dans le grain de *Hordeum vulgare*



	Témoin 0(g/m²)	Biochar - B1 141.73(g/m²)	Biochar - B2 236.22(g/m²)	Biochar - B3 472.44(g/m²)	Compost - C1 307.08(g/m²)	Compost - C2 614.173(g/m²)	Compost - C3 1228.34(g/m²)
La teneur en Cendre %	2.5	3	3	3.1	2.4	2.7	2.5

Figure 4 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des cendres dans le grain de *Hordeum vulgare.*

3.3.L 'amidon

Concernant la teneur en amidon, l'ANOVA révèle un effet hautement significatif pour le traitement, la dose et aussi de leur interaction ($p < 0,001$) (Tableau 5). Ces résultats démontrent que la teneur en amidon est fortement influencée par le type de traitement appliqué, la concentration utilisée, ainsi que par leur effet combiné.

La comparaison multiple des moyennes des traitements selon Tukey HSD a permis d'identifier deux groupes. Indiquant le traitement biochar dans un groupe supérieur avec la moyenne en amidon (65,63±0,002%) suivi par le deuxième groupe représenté par le compost avec une teneur inferieur (65,54 ± 0,03 %) (Figure 8).

Les tendances obtenues avec les doses appliquées indiquent que le biochar préserve mieux la teneur en amidon que le compost mais sans toutefois dépasser les niveaux de témoin. En effet l'étude indique que les teneurs les plus élevées en amidon sont obtenues avec le niveau témoin (65,65± 0,02%), qui se classe dans un groupe supérieur par rapport aux autres niveaux de traitement comme l'indique le test HSD de Tukey **: T>D3, D2, D1**

Les résultats obtenus de l'interaction entre les doses apportées et le traitement appliqués ont révélé que le témoin présentait une teneur en amidon la plus élevée (65,65 ± 0,01 %) (Figure 9), suivis par les doses B3 **et** B2 avec la même valeur moyenne **(**65,63 ± 0,02 %) et B1 (65,60± 0,02 %). À l'inverse les doses de compost C3 (65,52 ± 0,01 %), C2 et C1 (65,49 %) (Figure 9) ont enregistré les valeurs les plus basses. Il est visible que l'amendement du compost a entrainé une diminution significative dans la teneur en amidon par rapport au témoin. Cette réduction révèle un effet négatif du compost sur l'accumulation d'amidon, tandis que le biochar maintient des niveaux similaires au témoin. Deux groupes sont notés selon l'ordre décroissant : T, B3, B2, B1 > C3, C2, C1.

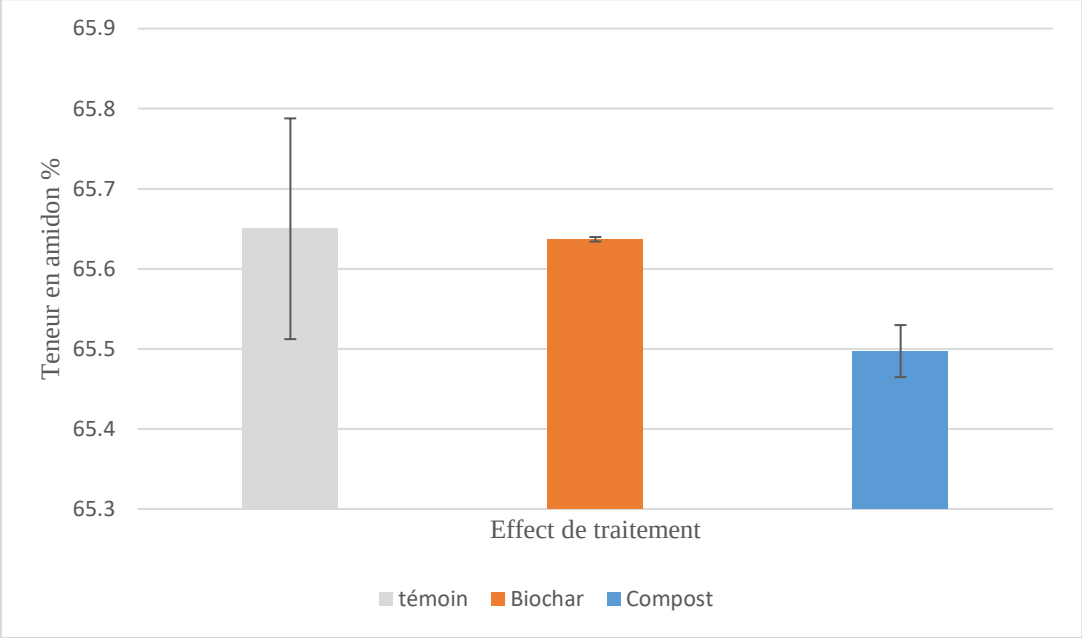
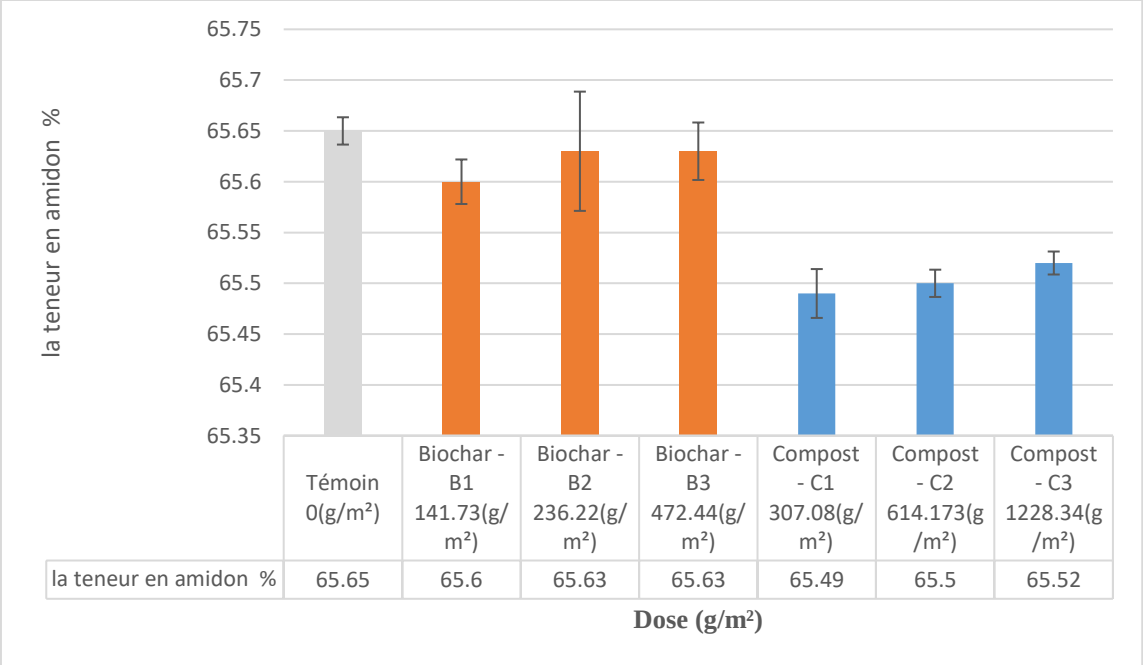


Figure 5 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amidon des grains de *l' Hordeum vulgare*



	Témoin 0(g/m²)	Biochar - B1 141.73(g/m²)	Biochar - B2 236.22(g/m²)	Biochar - B3 472.44(g/m²)	Compost - C1 307.08(g/m²)	Compost - C2 614.173(g/m²)	Compost - C3 1228.34(g/m²)
la teneur en amidon %	65.65	65.6	65.63	65.63	65.49	65.5	65.52

Figure 6 Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amidon dans le grain de *Hordeum vulgare.*

3.4.L 'amylopectine

L'étude statistique a révélé des effets hautement significatifs pour l'effet traitement, dose et de leur interaction (p <0,001) (Tableau 5)**.**

La comparaison multiple des moyennes obtenues de l'effet traitement a identifié deux groupes distincts. Le traitement biochar a présenté une moyenne plus élevée (52,50 ±0,002 %) à celle du compost (52,43 ±0,02%) (Figure 10).

Comme pour l'amidon les valeurs de l'amylopectine pour les trois doses appliquées restent inférieures à celles du témoin (52,52 ± 0,01 %). Le test HSD indique ces deux groupes : T>D3, D2, D1

Cette observation suggère que le biochar montre un effet relativement plus favorable que le compost cependant aucun des deux amendements n'atteint la teneur du témoin.

Concernant l'interaction traitement et doses, la teneur la plus élevée a été enregistrée pour le témoin T (52,52 ± 0,01 %), Le biochar note la valeur (52,51± 0,04%) avec le niveau B3. La plus faible valeur est obtenue avec le compost C1 (52,39± 0,01 %) (Figure 11)**. C**ette distribution

observée souligne que le biochar permet de mieux préserver la teneur en amylopectine que le compost mais il faut dire que la teneur de l'amylopectine pour les deux amendements reste toutefois inférieure au témoin. Les groupes observés pour l'amylopectine sont les suivants: **T, B3, B2, B1 > C3, C2, C1**.

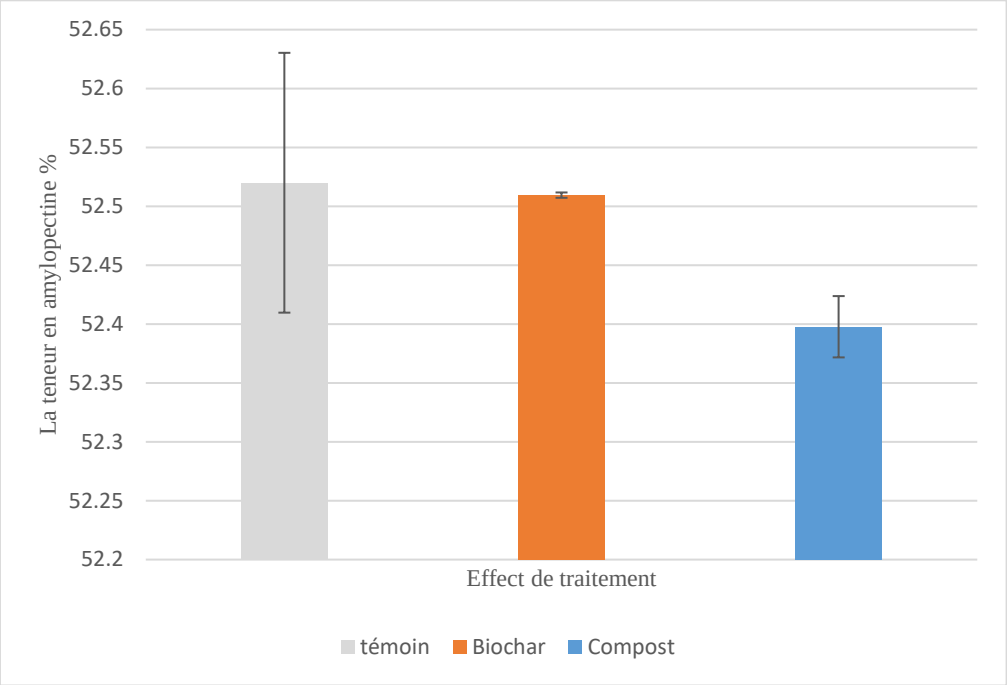
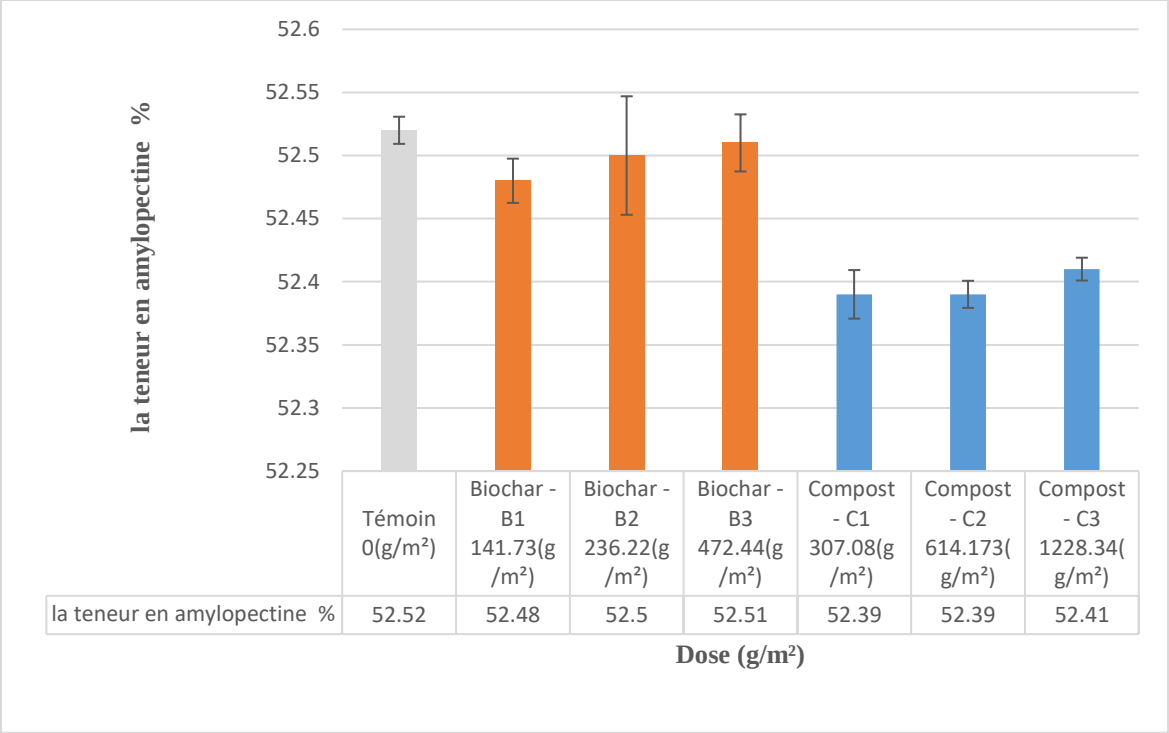


Figure 7 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amylopectine des grains de *l ' Hordeum vulgare*



	Témoin 0(g/m²)	Biochar - B1 141.73(g /m²)	Biochar - B2 236.22(g /m²)	Biochar - B3 472.44(g /m²)	Compost - C1 307.08(g /m²)	Compost - C2 614.173(g/m²)	Compost - C3 1228.34(g/m²)
la teneur en amylopectine %	52.52	52.48	52.5	52.51	52.39	52.39	52.41

Figure 8: Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amylopectine dans le grain de 1' *Hordeum vulgare.*

3.5.L'amylose

L'analyse statistique des résultats pour l'amylose ont souligné des effets hautement significatifs ($p < 0,001$) pour le traitement, la dose et leur interaction (Tableau 5), Cela montre que chacun de ces facteurs, pris séparément ou combinés ont influencé de manière notable ce paramètre de qualité.

Le test de Tukey a identifié deux groupes homogènes selon le type d'amendement. Le biochar montre une teneur moyenne en amylose plus élevée (13,12±0,0005%) comparée à celle obtenue avec le compost (13,10±0,006%) (Figure 12),

Les doses appliquées révèlent que, le témoin se place en premier position avec la plus haute teneur en amylose (13,13 ± 0,002 %). Le test de Tukey met en relief deux groupes dans l'ordre décroissant : T>D3, D2, D1

En termes d'interaction traitement et doses, la plus haute teneur en amylose a été observée chez le témoin (T) avec (13,13± 0,002 %). Le compost a montré les valeurs les plus faibles, notamment

avec la dose C1 (13,09 ± 0,004 %). À l'inverse, le biochar a donné les mêmes teneurs pour les doses B3, B2 et B1 (13,12 ± 0,005 %). Cependant, bien que le biochar soit plus efficace que le compost, ses performances restent inférieures à celles de témoin. La comparaison des moyennes met en relief les groupes suivants :

T, B3, B2, B1 > C3, C2, C1.

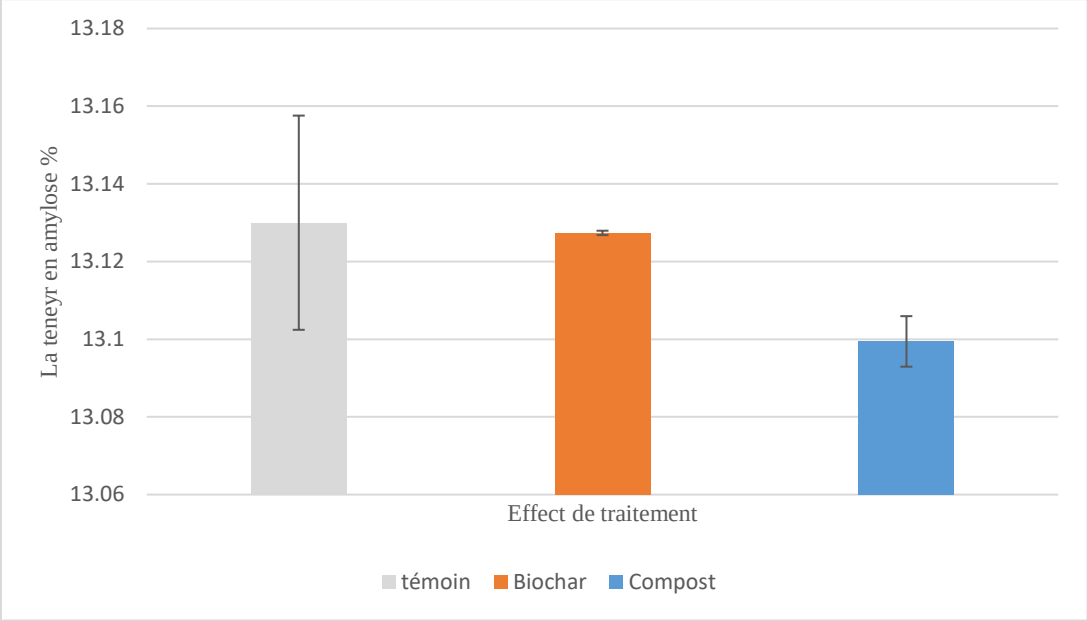
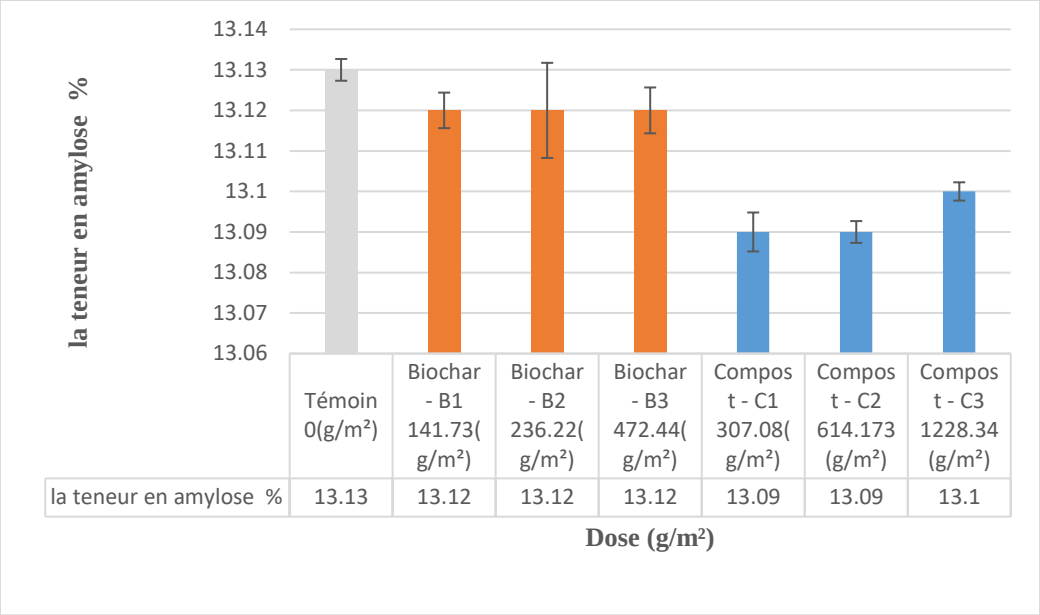


Figure 9 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur de l ' amylose des grains de *l ' Hordeum vulgare*



	Témoin 0(g/m²)	Biochar - B1 141.73(g/m²)	Biochar - B2 236.22(g/m²)	Biochar - B3 472.44(g/m²)	Compost - C1 307.08(g/m²)	Compost - C2 614.173 (g/m²)	Compost - C3 1228.34 (g/m²)
la teneur en amylose %	13.13	13.12	13.12	13.12	13.09	13.09	13.1

Figure 10 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur en amylose dans le grain de *Hordeum vulgare.*

3.6.Les sucres totaux

L'étude des résultats indique une différence significative uniquement pour l'effet traitement ($p<0,05$) (Tableau 5) alors que le facteur dose ($p>0,05$) et l'interaction dose x traitement ($p>0,05$) soulignent un effet non significatif (Tableau 5).

Le test de Tukey a permis de mettre en évidence deux groupes distincts pour l'effet traitement, indiquant une teneur moyenne pour le biochar (3,56±0,05µg/gMS) et pour le compost (3,52±0,01µg/gMS) (Figure 14), les moyennes sont classées comme suit : Biochar >Compost

Il apparait à partir des résultats obtenus que les teneurs des sucres totaux ne s 'améliorent pas sous l'effet des doses appliquées, d 'ou l 'obtention d'un seul groupe homogène indiquant des teneurs très proches. Avec le témoin la quantité des sucres totaux est de (3,57±0,03µg / gMS) pour la dose D2 et D3 et D1 les teneurs sont respectivement (3,54±0,03µg/gMS, 3,52±0,04 µg/gMS, 3,51±0,03µg/gMS).

La comparaison des teneurs obtenues des interactions dose et traitement selon le test de Tukey montre aussi un sel groupe illustrant une teneur extrême de 3,58±0,003µg/gMS pour B2 et 3,47±0,003 µg/gMS pour C1 (Figure 15).

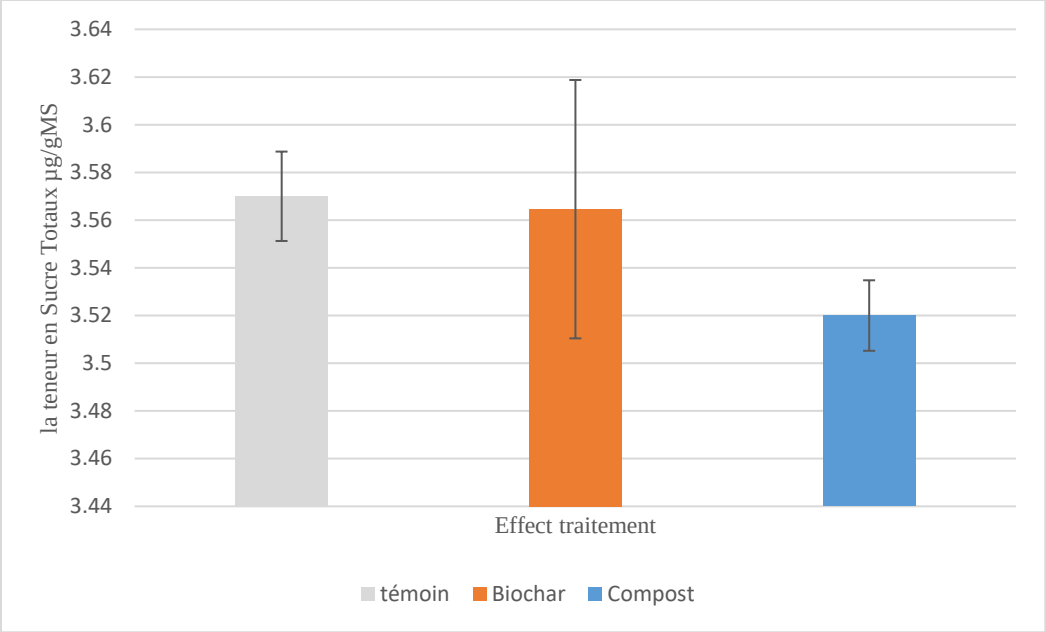
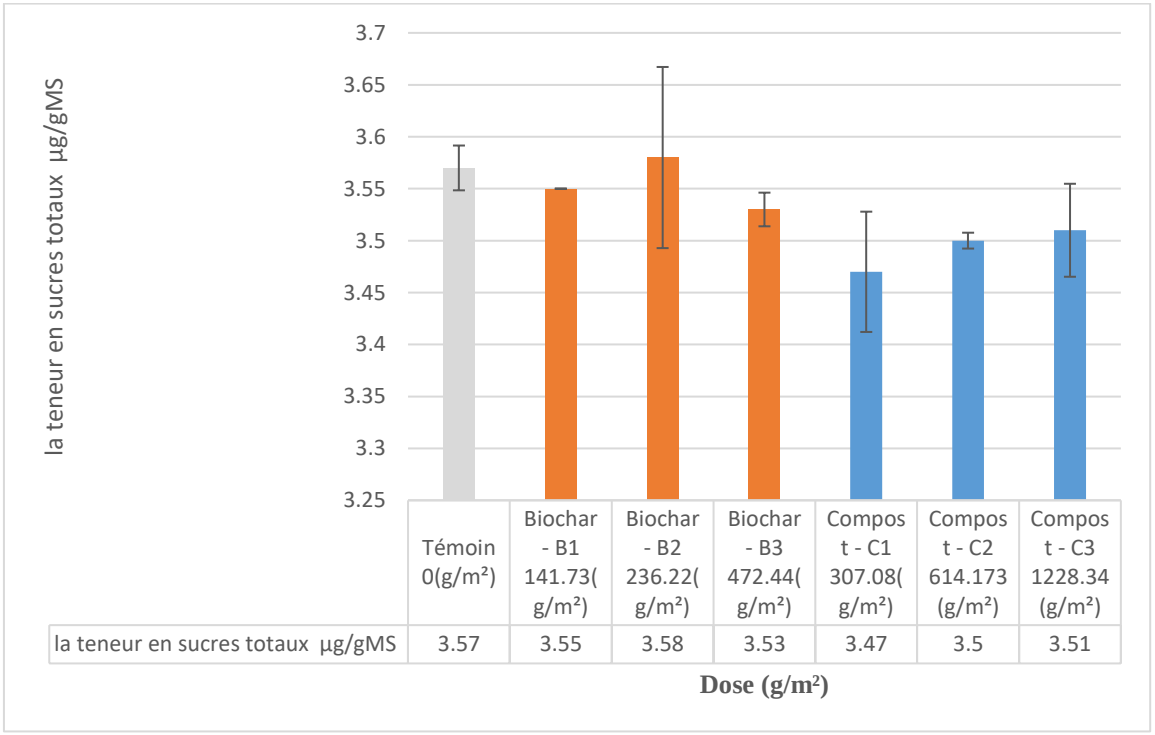


Figure 11: Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des sucres totaux dans le grain de *Hordeum vulgare*



	Témoin 0(g/m²)	Biochar - B1 141.73(g/m²)	Biochar - B2 236.22(g/m²)	Biochar - B3 472.44(g/m²)	Compost - C1 307.08(g/m²)	Compost - C2 614.173 (g/m²)	Compost - C3 1228.34 (g/m²)
la teneur en sucres totaux µg/gMS	3.57	3.55	3.58	3.53	3.47	3.5	3.51

Figure 12: Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des sucres totaux dans le grain de *Hordeum vulgare.*

3.7.Les sucres réducteurs

Au terme de l'analyse statistique des résultats du paramètre qualité « Sucre réducteur », il a été relevé un effet significatif ($p<0,05$) pour le facteur traitement, et un effet hautement significatifs pour l'effet dose ($p<0,001$) (Tableau 5). Cependant l'interaction entre les doses et les traitements n'ont montré aucune différence significative ($p>0,05$) (Tableau 5). Ainsi, on conclut que le type d'amendement organique et la dose appliquée influencent la quantité des sucres réducteurs présents dans l'orge.

Le biochar a noté une teneur plus élevée (11,75±0,002µg/gMS) par rapport au compost (11,73±0,02µg/gMS) (Figure 16) le test de comparaison Tukey souligne ces deux groupes :

Biochar >compost.

La teneur des sucres réducteurs fléchis avec les doses D2 et D3 indiquant des teneurs respectives 11,73±0,02 µg /gMS et 11,71±0,03 µg /gMS inferieurs à celle du témoin (11,75±0,002µg/gMS) et aussi la dose D1 (11,76±0,02µg/gMS). Les groups décelées à partir du test de Tukey sont: D1, T>T, D2> D2, D3.

Le test de Tukey a révélé un seul groupe pour l'effet interaction dose et traitement notant une teneur extrême obtenue avec le niveau B1 (11,77±0,003µg/gMS) et aussi la dose C3 (11,71±0,03µg/gMS) (Figure 17).

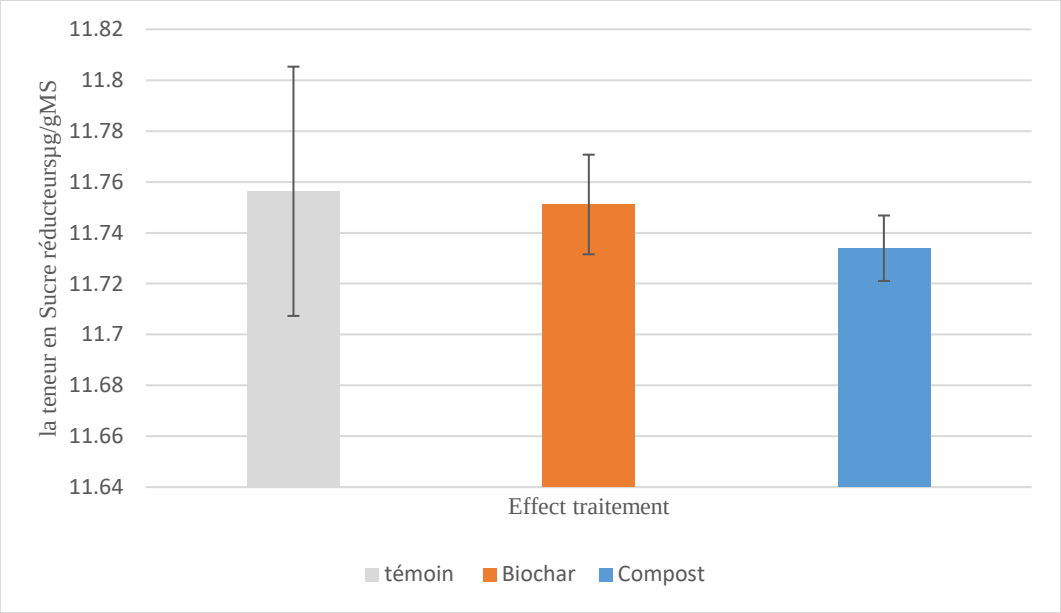


Figure 13 : Effet moyen du traitement biochar et compost sur la teneur des sucres réducteurs des grains de *l ' Hordeum vulgare*

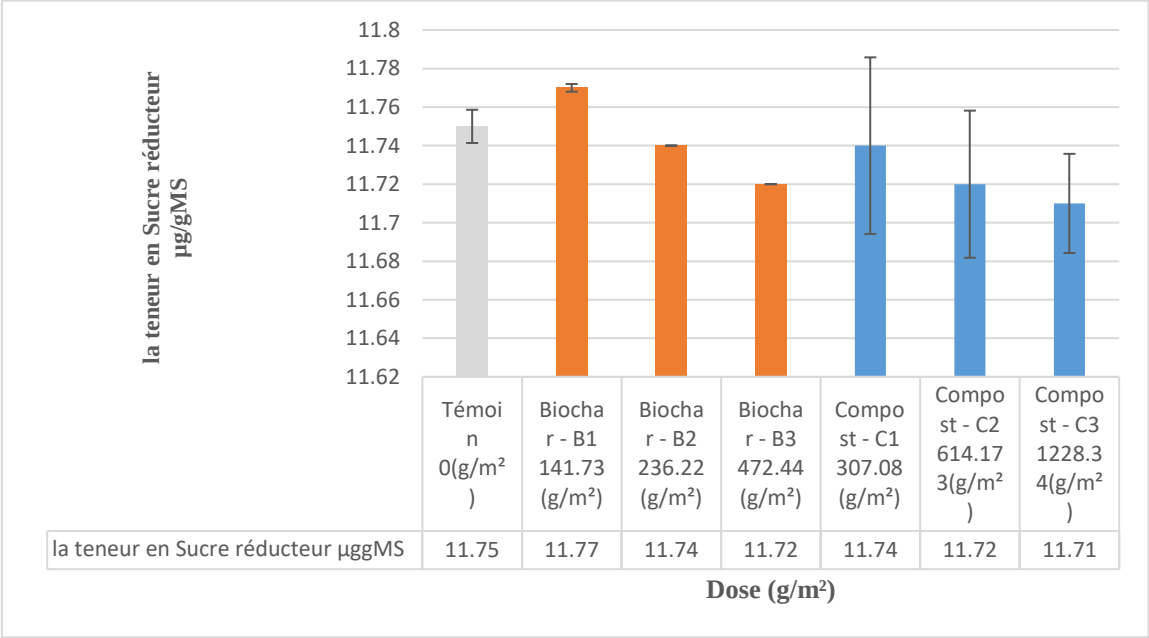


Figure 14 : Effet des doses de l'amendement biochar et compost sur la teneur des Sucres réducteurs dans le grain de *Hordeum.*

Chapitre 4: Discussions

Les valeurs de carbone observées à partir des résultats indiquent que les teneurs sont moyennes (Baise, 2000), Il se dégage aussi des résultats relatifs que les deux amendements aussi bien biochar que compost apportent une amélioration équivalente. Une amélioration qui est linéaire avec l'augmentation des doses, illustrant ainsi une forte accumulation avec la plus forte dose; Plusieurs auteurs(Lehmann et Joseph, 2015; Zahra et al ., 2021) rapportent que, les amendements organiques (biochar et compost) sont des matériaux riche en matière organique, une source essentielle en carbone, de ce fait ces matériaux sont fortement dotés d 'une bonne capacité à améliorer la fertilité des sols .Ils stimulant l'activité microbienne de ce dernier favorisant ainsi le déroulement des cycles des nutriments et la décomposition de la matière carbonée dans le sol(Chen et al., 2024)Il se dégage de cette étude que, l'interaction des doses appliquées avec les traitements indiquent une amélioration du carbone allouée surtout à la plus forte dose de compost, ceci trouve son explication dans le faite que le compost, en raison de sa richesse en matière organique contribue efficacement à l'augmentation du stock du carbone dans le sol et, indirectement, dans la plante Makino et al (2013).De même, Abdelraouf et al (2013), dans une étude sur le melon, ont rapporté que l'apport des doses progressif de compost augmentait la matière organique disponible, ce qui pourrait expliquer la hausse du carbone observée à forte dose dans notre essai. Contrairement à nos résultats Gul et al (2015), rapportent que, le biochar présente une efficacité supérieure à celle du compost, et soulignent une élévation dans le stock du carbone à un taux plus important à celui observé avec le compost.

La réponse de la plante d'orge à ces deux amendements en termes de qualité nutritionnelle indique que les teneurs obtenues pour l'ensemble des variables de qualité répondent aux Normes d'Afnor (1995).il se dégage aussi que, l'effet du biochar est supérieur à celui du compost. En effet la teneur des cendres observée dans les grains amendés par le biochar est supérieure à celle du compost. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par Lehmann et al(2011), qui ont démontré que le biochar constitue l'un des amendements organiques les plus efficaces en raison de ses propriétés physicochimiques qui favorisent une meilleure libération des nutriments dans le sol. Ces résultats corroborant avec ceux de Major et al (2010) qui ont montré, à travers leurs études menées sur des sols tropicaux appauvris, que la fertilisation au biochar permettait d'augmenter la concentration en cendre chez le maïs, traduisant une meilleure assimilation d'éléments minéraux essentiels tels que le calcium, le potassium et le magnésium.

En comparaison, l'étude de Makino et al(2013) a révélé que le compost joue un rôle important dans l'entretien de la fertilité du sol. Toutefois, ses effets immédiats sur les concentrations minérales dans les plantes apparaissent moins marqués que ceux du biochar, en raison d'une minéralisation plus lente et d'une disponibilité nutritive limitée à court terme.

Dans une étude plus récente, Waqas et al (2020) ont observé que l'application croissante de biochar sur le blé entrainait une augmentation significative dans la matière sèche et la teneur en cendre des grains, ces résultats concordent parfaitement avec les observations de notre essai sur la plante d'orge.

Concernant la teneur de l'amidon il est visible selon les résultats obtenus que, l'amendement biochar assure une teneur en amidon supérieure à celle du compost. Cette observation s'explique par le faite que ce fertilisant facilite une bonne disponibilité de nutriments essentiels à la biosynthèse de l'amidon en comparaison avec le compost dont la libération des nutriments se fait très lentement, dans ce sens Al-Bataina, Young, & Ranieri (2017) rapportent que, le compost libère les nutriments très lentement du fait de sa structure plus dense en comparaison avec le biochar. De leurs coté aussi, Ali et al (2021) notent que le biochar, grâce à sa richesse en carbone, favorise l'absorption de nutriments clés tels que l'azote, contribuant ainsi à la stimulation de la synthèse de l'amidon. Cependant la comparaison des moyennes obtenues révèle que la qualité alimentaire des grains d'orge en terme d'amidon est inférieur à celle des grains témoins, il se dégage à cet effet que les deux amendements n 'ont pas amélioré la teneur de l'amidon. Plusieurs auteurs rapportent que les amendements organiques améliorent les paramètres des plantes en terme de quantité pas en qualité ; que l'amélioration affecte la biomasse et le rendement en grains mais pas la qualité des grains (Boudjabi et Chenchouni, 2023).

L'amylopectine, composante majeure de l'amidon, suit une tendance similaire à celle de l'amidon. Le biochar a révélé une teneur légèrement supérieure à celle obtenue avec le compost, cependant toujours comme pour l'amidon, les deux amendements n'ont montré aucune amélioration par rapport au témoin.

Nos résultats concordent avec ceux de (Pérez-Guzmán et al., 2020 ; Cheng et al., 2017) qui ont montré que les sols amendés au biochar présentent une meilleure activité microbienne, favorisant

la dégradation des matières organiques en sucres simples, précurseurs de l'amylopectine. De leurs côté, Gong et al (2020) ont montré que le biochar modifie l'activité enzymatique et l'expression des gènes de biosynthèse de l'amidon, ce qui induit la modification de la structure fine de l'amylopectine, en réduisant les chaînes longues (Fb3) et en augmentant les chaînes courtes (Fa), ce qui pourrait affecter la qualité fonctionnelle de l'amidon chez le riz.

Les observations obtenues avec l ' amylose sont étroitement similaires à celles de l'amidon et l'amylopectine. Une supériorité est observée avec le biochar par rapport au compost. Toutefois, les deux amendements ont montré aussi une perte dans l'amylose en comparaison avec le témoin. Dans ce sens toujours, une étude menée sur deux variétés de riz Japonica a révélé que l'application de biochar à des doses comprises entre 5 et 40 tonnes par hectare entrainait une diminution significative dans la teneur en amylose ainsi qu'en amidon. Cette réduction est attribuée à une diminution de l'activité de la granule-bound starch synthase (GBSS), une enzyme clé impliquée dans la biosynthèse de l'amylose (Zhao et al., 2020).

L 'absence d'amélioration des composantes citées (amidon, amylopectine et amylose) pourrait être aussi attribuée à plusieurs autres facteurs, notamment un déséquilibre dans la libération des nutriments (Liu et al., 2021 ; Wang et al., 2023), ou encore les doses apportées des amendements est insuffisant pour induire un impact marqué sur la synthèse de ces composantes de qualité nutritionnelle cad l'amidon, amylopectine et amylose (Zhang et al.,2022).Cependant il faut noter que des plantes amendées ont présenté un développement végétale de la partie aérienne plus important à celles des plantes témoins, un développement qui a certainement utilisé de l'énergie à partir de la dégradation de ces trois composantes (Zhou et al., 2017).

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que seul l'amendement a eu un effet significatif sur les sucres totaux de l'orge, indiquant une teneur moyenne plus élevée pour le biochar en comparaison avec le compost. Ces résultats corroborent avec ceux de Waqas et al (2020), qui en examinant l'effet du biochar sur la matière sèche et les composés organiques du blé, confirment que le ce fertilisant améliore non seulement la croissance des plantes, mais aussi la qualité des produits récoltés. Ces auteurs expliquent leurs résultats par la richesse minérale du biochar et à sa capacité à modifier favorablement les propriétés biologiques et chimiques du sol. De même, Nigussie et al (2012), dans une étude sur le maïs, ont observé que l'application du biochar favorisait la synthèse de sucres solubles.

À l'inverse, même si le compost a montré un effet plus modéré dans cette étude, plusieurs travaux ont mis en évidence son potentiel dans d'autres conditions. Par exemple, Saidou et al (2012), dans une recherche sur les systèmes de culture vivrière, ont démontré que le compost améliorait les rendements et certains paramètres qualitatifs du maïs, dont les teneurs en sucres, sous des conditions climatiques spécifiques, Par exemple, Saidou et al (2012), dans une recherche menée au Bénin dans des systèmes de culture vivrière sous climat tropical humide, avec des sols ferrugineux tropicaux pauvres en matières organiques, ont démontré que l'application de compost améliorait non seulement les rendements, mais aussi certains paramètres qualitatifs du maïs, dont les teneurs en sucres. Cette amélioration était attribuée à la minéralisation progressive de la matière organique et à la libération lente des nutriments, adaptée aux conditions agro écologiques locales. De même, Abdelraouf et al (2013), en travaillant sur la culture du melon, ont constaté une amélioration des sucres solubles avec l'utilisation de compost, attribuée à la libération progressive des nutriments et à une meilleure rétention d'humidité dans le sol. Makino et al (2013), dans leur analyse comparative entre compost et biochar, ont souligné que le compost joue un rôle important dans l'entretien durable de la fertilité du sol, bien que ses effets à court terme sur les composés solubles comme les sucres soient souvent moins marqués.

Concernant les sucres réducteurs, Comme pour l'ensemble des variables étudiées cette fois aussi, le biochar a permis d'obtenir une teneur supérieure à celle du compost. Ces résultats corroborent les observations de Lehmann et Joseph (2015), qui ont démontré que le biochar améliore l'accumulation de composés carbonés dans la plante, notamment les sucres simples comme le glucose et le fructose, qui sont les principaux sucres réducteurs.

On peut dire que les sucres réducteurs sont issus de la transformation et l'hydrolyse des composes carbonées amylose et amylopectine à cet effet on obtient la même tendance que celle observée pour ces matières carbonées.

À cet égard, Nigussie et al (2012), dans une expérimentation sur maïs, ont observé une augmentation des sucres solubles (en particulier des sucres simples comme le saccharose, le glucose et le fructose) en réponse à l'apport de biochar, précisément grâce à une meilleure disponibilité du potassium. De plus, Zhou et al (2017) ont montré que l'application de biochar sur la tomate augmentait les sucres réducteurs dans les fruits. Abdelraouf et al (2013) ont montré une

amélioration des sucres réducteurs dans les fruits du melon en réponse au compost, grâce à une meilleure humidité du sol et une libération progressive des nutriments.

De même, Saidou et al (2012) ont noté que le compost contribue à améliorer les rendements et certains paramètres qualitatifs, comme les sucres, dans des systèmes de culture traditionnels. Il se dégage selon les moyennes obtenues dans cet essai que, la teneur des sucres réducteurs s'affaiblie avec les fortes doses, cette observation est appuyée par Makino et al (2013) qui rapportent que, des apports excessifs en matière organique peuvent provoquer des effets négatifs à court terme sur certaines cultures.

Conclusion

L'objectif fixé dans ce modeste mémoire est d'évaluer l'effet de deux amendements organiques sur la qualité nutritionnelle des grains d'orge (*Hordeum vulgare* L).

Les résultats obtenus ont montré clairement que le biochar a eu un impact plus déterminant que le compost sur l'ensemble des variables étudiées (amidon amylopectine, amylose sucres réducteurs et aussi sucres totaux) toutefois, la comparaison avec le plante témoin a souligné que l'apport des deux fertilisants n'a pas affecté positivement ces paramètres, en effet tous les composantes de qualité testées soulignaient des teneurs inferieurs par rapport au témoin mis à part les cendres.

Il serait intéressant de reproduire cette étude, en utilisant plusieurs doses de biochar associées avec plusieurs doses de composts en incluant aussi plusieurs plantes fourragères afin de déterminer réellement les doses exactes qui permettraient une bonne amélioration dans la qualité alimentaire des différentes plantes.

Références bibliographiques

1. Abdel-Azeem, A. M., El-Naggar, A. A., Amer, A., Ebrahim, S. A., & Sheha, A. M. (2023). Agro-economic assessment of intercropping of barley with fenugreek and black cumin. Egyptian Journal of Agricultural Research, *101*, 961–971.
2. Abdelraouf, R. E., Hozayn, M. A. M., Abdel Monem, A. M., & Abd El Latif, A. A. (2013). Effect of organic manure and biofertilizers on growth, yield, and quality of melon. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, *7*(7), 579–587.
3. Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J., & King, S. (2009). Characterization of food waste and bulking agents for composting. Waste Management, 29(2), 795–803.
4. AFNOR. (1995). NF ISO 10694 - Qualité du sol — Détermination du carbone organique et du carbone total après combustion sèche (analyse élémentaire). Association Française de Normalisation.
5. Agegnehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2016). Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. Science of the Total Environment, 543, 295–306.
6. Al Khayri, J. M., Jain, S. M., & Johnson, D. V. (2019). Advances in Plant Breeding Strategies: Cereals (Vol. 5).
7. Al-Bataina, B. B., Young, T. M., & Ranieri, E. (2017). Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process. Waste Management, 69, 136–153. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.012
8. Ali, I., Ullah, S., Iqbal, A., Xie, H., He, L., Ahmad, S., Hussain, I., Raza, H., & Wei, S. (2021). Combined application of biochar and nitrogen fertilizer promotes the activity of starch metabolism enzymes and the expression of related genes in rice in a dual cropping system. BMC Plant Biology, 21, Article 600. https://doi.org/10.1186/s12870-021-03384-w
9. Alshamlan, N. S. (2023). Effect of germination process on chemical composition of barley grains, nutritional value. Journal of Food and Dairy Sciences, *14*, 1–4.
10. Amlinger, F., Peyr, S., & Dreher, P. (2007). Environmental impacts of compost application. European Commission Project Report.
11. Andrew,S. Karen P ,G. Irene A , C. Alexander A ,C. Hawes ,J. Wishart , et al , «The agronomic performance and nutritional content of oat and barley varieties grown in a northern maritime environment depends on variety and growing conditions» . Journal of Cereal Science, vol74,P1-10,2017.
12. Anne, P. (1945). Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. Annales Agronomiques, 16, 161–172.
13. Araus, J. L., Ferrio, J. P., Voltas, J., Aguilera, M., & Buxó, R. (2014). Conditions and crop evolution in ancient Near East agriculture. Nature Communications.

14. Baik, B.-K., & Ullrich, S. E. (2008). Barley for food: Characteristics, improvement, and renewed interest. Journal of Cereal Science, 48(2), 233–242.
15. Baise, D. (2000). Guide des analyses en pédologie (257 p.). Paris, France : INRA Éditions.
16. Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. Environmental Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/S11356-013- 2051-9
17. Benlaribi, M., Monneveux, P., & Grignac, P. (1990). Étude des caractères d'enracinement et de leur rôle dans l'adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (*Triticum durum* Desf.). Agronomie, *10*(2), 139–144. https://doi.org/10.1051/agro:19900204
18. Bian, J., Deng, P., Zhan, H., Wu, X., Nishantha, M. C., Yan, Z., et al. (2019). Transcriptional dynamics of grain development in barley (*Hordeum vulgare* L.). Molecular Advances in Wheat and Barley.
19. Bizhan, S. P. (2023). Influence of the joint use of phosphorus and magnesium fertilizers on the background of nitrogen and potassium fertilizers on the productivity, quality and removal of nutrition elements in spring barley depending on the acidity of sod-podzolic soil. Agrokhimiya, (6).
20. Blattner, F. (2009). Progress in phylogenetic analysis and a new infrageneric classification of the barley genus *Hordeum* (Poaceae: Triticeae). Reviews, *59*, 471–480.
21. Blattner, F. (2018). Taxonomy of the genus *Hordeum* and barley (*Hordeum vulgare*). In The Barley Genome (pp. 11–23).
22. Blizak, K., Bourahla, I., & Raouane, N. (2022). Étude de la double exploitation de l'orge chez quelques agriculteurs de la région de M'Sila [Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila]. Département des Sciences Agronomiques.
23. Borthakur, P. K., Bhattacharyya, R. K., & Das, U. (2019). Biochar in Organic Farming. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04657-6_7
24. Boudjabi S, Chenchouni H (2023). Comparative effectiveness of exogenous organic amendments on soil fertility, growth, photosynthesis and heavy metal accumulation in cereal crops. Heliyon 9(4):e14615. https://doi.org/10.1016/j.heliyon .2023.e14615
25. Boulal, H., Zaghouane, O., El Mourid, M., & Rezgui, S. (2007). Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orge) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie). TIGC, INRA, ICARDA, Algérie.
26. Brink, M., & Belay, G. (Eds.). (2006*).* Ressources végétales de l'Afrique tropicale, Volume 1: Céréales et légumes secs (Éd. française). PROTA Foundation, Wageningen; Backhuys Publishers, Leiden; CTA, Wageningen.
27. Chavarekar, S., Thakral, S. K., & Meena, R. K. (2014). Effect of organic and inorganic nitrogen fertilizers on quality of barley (Hordeum vulgare L.). Annals of Agricultural Research, *34*(2). https://epubs.icar.org.in/index.php/AAR/article/view/37928

28. Chen, L., Guo, L., Deng, X., Pan, X., Liao, P., Xiong, Q., *et al.* (2020). Effects of biochar on grain quality and starch structure of Japonica rice. Food Chemistry, 330, 127187. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127187
29. Chen, L., Zhang, H., Jia, X., Fang, Y., & Lin, C. (2024). Soil Fertility and Bacterial Community Composition in Response to the Composting of Biochar-Amended Chicken Manure. Agronomy, 14(5), 886.
30. Cheng, H., Yang, X., & Wang, Y. (2017). Biochar stimulates the mineralization of simple carbon substrates in a sandy loam soil. Global Change Biology Bioenergy, 9(6), 1083–1093. https://doi.org/10.1111/gcbb.12402
31. CIBE. (2018). Méthodes de mesure du taux de cendres – Fiche 18 (Réf. 010367). Comité Interprofessionnel du Bois-Énergie. https://cibe.fr/wp-content/uploads/2018/11/fiche18-methodesmesure-taux-cendre-010367.pdf
32. Dar, M. H., Singh, N., Dar, G. H., Mahdi, S. S., Razvi, S. M., & Groach, R. (2014). Biofertilizers - means of increasing sustainable crop production and are ecofriendly. LIFE SCIENCES LEAFLETS.
33. Dutta, M., Bhattacharyya, S., Nandy, P., & Paul, A. (2018). A review on products from barley. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, *7*(6), 1718–1725. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.706.203
34. EDAFOTEC. (n.d.). Reducing emissions or sequestering carbon? [Photographie]. Edafotec. https://www.edafotec.com/reducing-emissions-or-sequestering-carbon/?lang=en .
35. El-Naggar, A., Shaheen, S. M., Ok, Y. S., Rinklebe, J., & Sarkar, B. (2019). Biochar for agronomic improvement: Nutrient dynamics and interactions with soil and plant systems. Journal of Environmental Management, 234, 123–138.
36. Fageria, N. K., Filho, M. P. B., Moreira, A., & Guimarães, C. M. (2009). Foliar Fertilization of Crop Plants. Journal of Plant Nutrition. https://doi.org/10.1080/01904160902872826
37. FAO., 2003. Les engrais et leurs applications, quatrième édition, 77p.
38. Farag, M. A., Farag, M. A., Xiao, J., Abdallah, H. M., & Abdallah, H. M. (2020). Nutritional value of barley cereal and better opportunities for its processing as a value-added food: a comprehensive review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1835817
39. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2018). Conservation agriculture and cereal nutrient biofortification: A review. Agronomy for Sustainable Development, 38(6), 1–22.
40. Gate P., *et* Giban M., Stades du blé. Ed. Lavoisier, ITCF, 2003. p 68
41. Geng, L., Li, M., Zhang, G., & Ye, L. (2022). Barley: a potential cereal for producing healthy and functional foods. Food Quality and Safety. https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyac012
42. Ghahremaninejad, F., Hoseini, E., & Jalali, S. (2021). The cultivation and domestication of wheat and barley in Iran: Brief review of a long history. Botanical Review.

43. GHERAIRIA I ET ZARDOUDI F (2018). Effet de la fertilisation sur la culture de blé dur (TritucumdurumDesf.) dans la région de Guelma. Mémoire de Master : Sciences Agronomiques Spécialité/Option : phytopharmacie et production des végétaux Département : Écologie et génie de l'Environnement. Université de Guelma Algérie, 4, 5, 8, 9, 10, 13,14, 15p
44. Gong, D., Xu, X., Wu, L., Dai, G., Zheng, W., & Xu, Z. (2020). Effect of biochar on rice starch properties and starch-related gene expression and enzyme activities. Scientific Reports, 10(1), 16917. https://doi.org/10.1038/s41598-020-73888-2
45. Gonzalez, P. Almendros, A. Obrador, G. M. Alvarez, "Zinc Application in Conjunction with Urea as a Fertilization Strategy for Improving Both Nitrogen Use Efficiency and the Zinc Biofortification of Barley." Journal of the Science of Food and Agriculture, July 2019.
46. Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). A review of biochar properties and their roles in improving soil quality. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, *15*(2), 449–465.
47. Gwang, D., Kim, Y., & Deuk, S. P. (2000). A fertilizer containg organic compounds and minerals
48. Hargas, H. (2007). Identification et sélection des caractères de résistance à la sècheresse chez *le blé dur (Triticum durum Desf.)* dans les conditions semi-arides des hauts plateaux de Sétif (Doctoral dissertation, INA).
49. HAVRYLIUK KHARZHEVSKA, N. (2019.). Growth cycle of the wheat plant [Illustration]. Dreamstime. https://www.dreamstime.com/image122366457
50. He, Z., Lai, T., He, C., & Yuan, X. (2017). Compound fertilizer, preparation method and application thereof.
51. Hou, F., & Mo, S. (2017). Soil fertility increasing agent capable of improving saline-alkaline performance of cornfields as well as preparation method and use method.
52. Huang, P., Zhang, J., Xin, X., Zhu, A., Zhang, C., Ma, D., Zhu, et al, (2015). Proton accumulation accelerated by heavy chemical nitrogen fertilization and its long-term impact on acidifying rate in a typical arable soil in the Huang-Huai-Hai Plain. Journal of Integrative Agriculture. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60750-4
53. Idehen, E., Tang, Y., & Sang, S. (2017). Bioactive phytochemicals in barley. Journal of Food and Drug Analysis, 25(1), 148–161.
54. Jeanty, A., Bouby, L., Bonhomme, V., Balfourier, F., Debiton, C., Dham, C., *et al.* (2023). Barley systematics and taxonomy foreseen by seed morphometric variation. PLOS ONE, *18*(5), e0285195. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0285195
55. Karsai ,E. Igartua ,A. M. Casas ,T. Kiss ,V. Soós ,K. Balla , et al .,(2013) «Developmental patterns of a large set of barley (*Hordeum vulgare*) cultivars in response to ambient temperature » reserch article , journal of the science of food and agriculture.

56. Kaur, A., Singh Purewal, S., Phimolsiripol, Y., & Punia Bangar, S. (2024). Unraveling the hidden potential of barley (*Hordeum vulgare*). Food Chemistry.
57. Kumar, M. (2021). Influence of nitrogen fertilizer levels on growth and quality of barley (*Hordeum vulgare*) varieties. International Journal of Chemical Studies, *9*(1), 444–447. https://doi.org/10.22271/chemi.2021.v9.i1f.11272
58. Kumari, S., Makkouk, K. M., & Najar, A. (2023). Barley. In L. P. Awasthi (Ed.), viral diseases of field and horticultural crops (Ch. 6, pp. 55–61). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90899-3.00006-1
59. Lal, R. (2009). Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. Food Security, *1*(1), 45–57. https://doi.org/10.1007/s12571-009-0009-z
60. Langridge, P. (2018). Economic and academic importance of barley. In N. Stein & G. Muehlbauer (Eds.), the barley genome (pp. 1–10). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92528-8_1
61. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009*)*. Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan.
62. Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd Ed.). Routledge.
63. Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota – A review. Soil Biology and Biochemistry, *43*(9), 1812–1836. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022
64. Lei, Y., Xu, L., Wang, M., Sun, S., Yang, Y., & Xu, C. (2023). Effects of biochar on tomato yield and quality in a solar greenhouse. Journal of Integrative Agriculture, *16*(6), 1364–1374. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61460-5.
65. Léry, F. (1982). Agriculture maghrébine ou méditerranéenne.
66. Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., & Goodale, C. (2010). Fate of soil-applied black carbon: Downward migration, leaching and soil respiration. Global Change Biology, *16*(4), 1366–1379. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02044.x
67. Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J. and Lehmann, J. (2010) Maize Yield and Nutrition during 4 Years after Biochar Application to a Colombian Savanna Oxisol. Plant and Soil, 333, 117-128. https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0
68. Makino, T., Sugahara, K., & Sakurai, Y. (2013). Long-term effects of compost application on the soil properties and productivity of barley. Soil Science and Plant Nutrition, 59(3), 349–360.
69. Martínez-López, J. A., López-Urrea, R., Martínez-Romero, Á. Pardo, J. J., Montero, J., & Domínguez, A. (2022). Sustainable production of barley in a water-scarce Mediterranean agroecosystem. Agronomy, *12*(6), 1358. https://doi.org/10.3390/agronomy12061358

70. Miller, J. C. (Inventor). (2014). Method and system for agricultural fertigation (U.S. Patent No. 8, 690,983 B1). U.S. Patent and Trademark Office.
71. Moughli L., 2000. Transfert de technologie en agriculture : Les engrais minéraux caractéristiques et utilisation. N 72.1p 1-3-4.
72. Mukund, J. (2015). Textbook of field crops. New Delhi, India: PHI Learning Pvt. Ltd.
73. Muthezhilan, R., Ravikumar, V., Karthik, R., & Hussain, A. J. (2014). Development of seaweed liquid fertilizer (SLF) consortium for the enhancement of agriculturally important crop plants. Biosciences, Biotechnology Research Asia, *11*(3), 1429–1434. https://doi.org/10.13005/BBRA/1418
74. Nigussie, A., Kissi, E., Engdaw, M. M., & Ambaw, G. (2012). Effect of biochar on soil properties and nutrient uptake of lettuce (*Lactuca sativa*) *grown in a greenhouse.* Soil Use and Management, *28*(1), 80–86. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00381.x
75. Parrado, J. D., Savin, R., & Slafer, G. A. (2024). Dynamics of apex and leaf development in barley as affected by PPD-H1 alleles in two contrasting PHYC backgrounds under short or long photoperiod. Physiology and Breeding of Cereals, *15*.
76. Pérez-Guzmán, M. A., Govaerts, B., & Verhulst, N. (2020). Biochar improves soil enzyme activity and nutrient availability in a semi-arid environment in Mexico. Agricultural & Environmental Letters, 5(1), e20082. https://doi.org/10.1002/agg2.20082
77. Raj, R., Shams, R., Pandey, V. K., Dash, K. K., Singh, P., & Bashir, O. (2023). Barley phytochemicals and health promoting benefits. Journal of Agriculture and Food Research, *2*, 100219. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100219
78. Ross, A., Shewry, R., Koksel, H., & Taylor, J. (2023). Barley. In ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology (Ch. 16, pp. 153–160).
79. SABLONS, D. (n.d.). Épi d'orge – structure et composition [Illustration]. Larousse. https://www.larousse.fr
80. Saidou, A., Tossah, B. K., Kossou, D. K., Richards, W., & Kuyper, T. W. (2012). Effects of compost and mineral fertilizer on maize yield in the West African savanna. Agronomy for Sustainable Development, *32*, 595–604. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0050-8
81. Sheha, A. M., Mansour, M., Ebrahim, A., El Gamal, S. H., & Ghareeb, E. (2022). Agro-economical evaluation for intercropping sugar beet and barley under combinations of barley cutting and nitrogen level treatments. International Journal of Plant & Soil Science, *34*, 174–190.
82. Singh, A., Pandey, A. K., & Singh, U. (2020, July). Effect of integrated nutrient management practices on soil chemical properties: A review. International Journal of Chemical Studies, *8*(4), 3438–3441. https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4aq.10186
83. Soltner, D. (2005) «Les grandes productions végétales. 20eme édition. Collection science et techniques» Barley: Production, Improvement and Uses (World Agriculture Series), P303-308.

84. Sreenivasulu, N., Borisjuk, L., Junker, B. H., Mock, H.-P., Rolletschek, H., Seiffert, U., Weschke, W., & Wobus, U. (2010). Barley grain development: Toward an integrative view. In K. W. Jeon (Ed.), International review of cell and molecular biology (Vol. 281, pp. 49–89). Academic Press. https://doi.org/10.1016/S1937-6448(10)81002-8
85. Stanca, M., Gianinetti, A., Rizza, F., & Terzi, V. (2016). Barley: An overview of a versatile cereal grain with many food and feed uses. In Encyclopedia of Food Grains (Vol. 1, pp. 147–152).
86. Tambussi, E. A., Nogués, S., Ferriò, P., Voltas, J., & Araus, J. L. (2005). Un potentiel de rendement plus élevé améliore-t-il les performances de l'orge dans les conditions méditerranéennes : une étude de cas. Recherche sur les grandes cultures.
87. THE BOOK WORM. (n.d.). Composition de l'épillet [Illustration]. Alamy Photo Stock. https://www.alamy.com
88. Uzoma, K. C., Inoue, M., Heninstoa, A., Fujimaki, H., Ahmad, Z., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. Soil Use and Management, *27*(2), 205–212. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x
89. Wang, Y., Chen, Y., & Zhang, L. (2023). Site-specific responses of crop quality to organic amendments: Understanding soil-plant interactions. Soil Biology & Biochemistry, 174, 108826. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2023.108826
90. Wang, Z. R. (2001). Granular CO_2 gas fertilizer and its preparation method (Chinese Patent No. CN 1 342 816 A). State Intellectual Property Office of the People's Republic of China.
91. Waqas, M., Abid, M., Nawaz, M. (2020). Biochar enhances wheat yield and soil properties under deficit irrigation. Agriculture, Ecosystems & Environment, 295, 106901.
92. Waqas, M., Aburia, H. M., Khan, M. N., Hussain, A., & Lin, W. Biochar application and its effects on plant growth, nutrient uptake, and soil properties: A review. Journal of Environmental Management, 256, 109914.
93. Yakomaskin, S. S., Kargin, V. I., & Zubarev, A. A. (2024, July). Indicators of barley grain quality depending on mineral fertilizers and foliar plant nutrition. Аграрный Научный Журнал *(*Agrarian Scientific Journal*)*.
94. Yiblet, Y., Misganaw, W., & Adamu, E. (2024). Nutritional and functional composition of barley varieties from Legambo district, Ethiopia. The Scientific World Journal, Article 1367540. https://doi.org/10.1155/2024/1367540
95. Zahra, M. B., Aftab, M., Akhter, A., & Haider, M. S. (2021). Cumulative effect of biochar and compost on nutritional profile of soil and maize productivity. Journal of Plant Nutrition, *44*(11), 1664–1676. https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1882062
96. Zhang, H., Liu, Y., & Li, J. (2022). Threshold effects of organic amendments on starch biosynthesis in cereals. Plant Physiology and Biochemistry, 170, 93–101. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.12.015

97. Zhao, Y., Chen, Y., Dai, H., Cui, J., Wang, L., & Sui, P. (2021). Effects of organic amendments on the improvement of soil nutrients and crop yield in sandy soils during a 4-year field experiment in Huang-Huai-Hai Plain, Northern China. Agronomy, *11*(1), 157. https://doi.org/10.3390/agronomy11010157
98. Zhu, F. (2017). Barley starch: Composition, structure, properties, and modifications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, *16*(4), 558–579. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12265

Annexes



Figure 1 : Échantillons et solutions préparées pour le dosage du carbone organique dans le sol



Figure 19 : Spectrophotomètre



Figure 20 : Bain-marie



Figure 21 : Tubes à essai contenant les extraits d'orge avec les réactifs

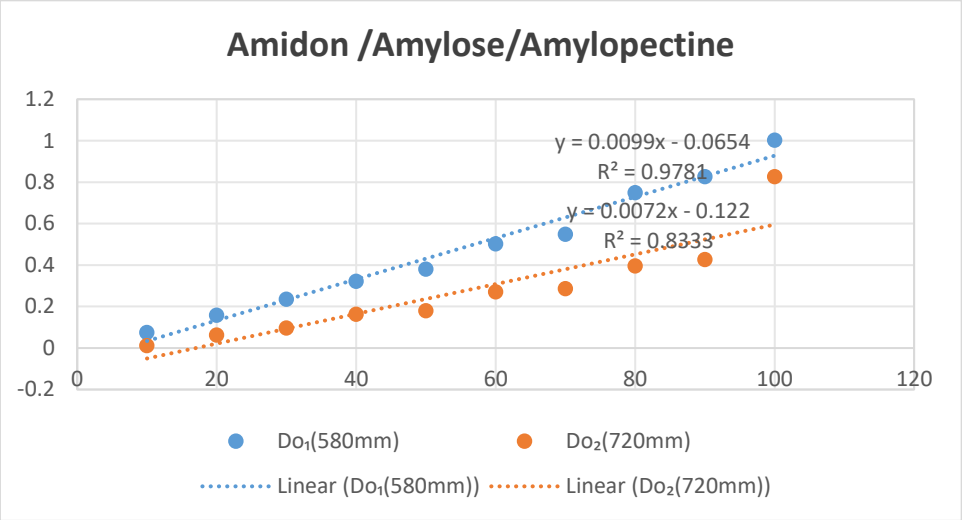


Figure 22: La courbe d'étalonnage de l'amidon, l'amylopectine et l'amylose

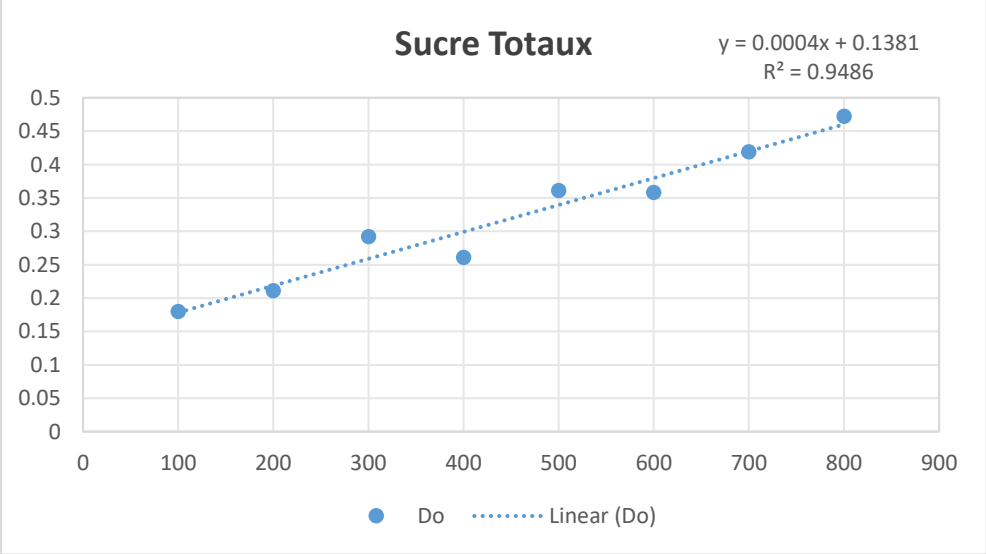


Figure 23 : La courbe d'étalonnage des Sucre Totaux

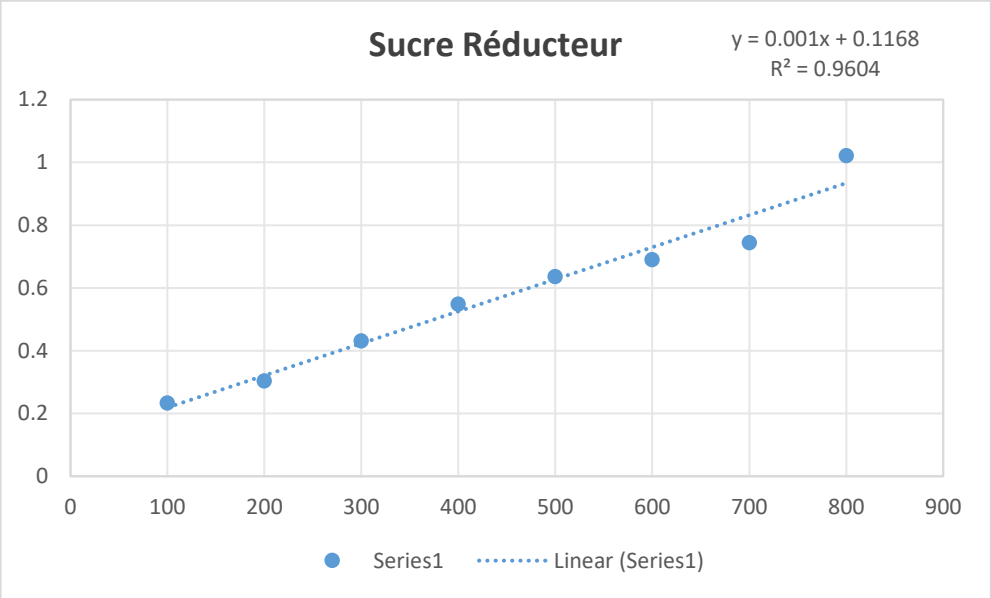


Figure 24 : La courbe d'étalonnage de les Sucre Réducteur

Tableau 1 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Carbone »

	Univariate Tests of Significance for Carbone (Spreadsheet1 chahd carbone) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	111,0475	1	111,0475	1052,895	0,000000
trait	0,2871	1	0,2871	2,722	0,118451
dose	4,4863	3	1,4954	14,179	0,000090
trait*dose	2,8197	3	0,9399	8,912	0,001053
Error	1,6875	16	0,1055		

Tableau 2 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur le carbone

Tukey HSD test; variable Carbone (Spreadsheet1 chahd carbone)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,10547, df = 16,000

Cell No.	trait	Carbone Mean	1
1	1	2,041667	****
2	2	2,260417	****

Tableau 3 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur le carbone

Tukey HSD test; variable Carbone (Spreadsheet1 chahd carbone)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,10547, df = 16,000

Cell No.	dose	Carbone Mean	1	2
2	2	1,729167	****	
3	3	1,833333	****	
1	1	2,208333	****	
4	4	2,833333		****

Tableau 4 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Cendre »

Univariate Tests of Significance for Cendre (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	233,8203	1	233,8203	5281,588	0,000000
traitement	1,3203	1	1,3203	29,824	0,000013
DOSE	0,5234	3	0,1745	3,941	0,020313
traitement*DOSE	0,5234	3	0,1745	3,941	0,020313
Error	1,0625	24	0,0443		

Tableau 5 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les Cendre

Cell No.	traitement	Cendre Mean	1	2
	Tukey HSD test; variable Cendre (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,04427, df = 24,000			
2	compost	2,500000	****	
1	biochar	2,906250		****

Tableau 6 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur les Cendre

Cell No.	DOSE	Cendre Mean	1	2
	Tukey HSD test; variable Cendre (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,04427, df = 24,000			
1	1	2,500000		****
2	2	2,687500	****	****
3	3	2,812500	****	
4	4	2,812500	****	

Tableau 7 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amidon »

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
	Univariate Tests of Significance for Amidon (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
Intercept	137661,3	1	137661,3	213759847	0,000000
traitement	0,1	1	0,1	107	0,000000
DOSE	0,1	3	0,0	29	0,000000
traitement*DOSE	0,0	3	0,0	12	0,000044
Error	0,0	24	0,0		

Tableau 8: Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amidon

Cell No.	traitement	Amidon Mean	1	2
	Tukey HSD test; variable Amidon (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00064, df = 24,000			
2	compost	65,54250	****	
1	biochar	65,63550		****

Tableau 9 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amidon

Tukey HSD test; variable Amidon (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00064, df = 24,000

Cell No.	DOSE	Amidon Mean	1	2
2	2	65,55050	****	
3	3	65,56525	****	
4	4	65,58175	****	
1	1	65,65850		****

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amylopectine »

Univariate Tests of Significance for Amylopectine (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	88103,26	1	88103,26	213759847	0,000000
traitement	0,04	1	0,04	107	0,000000
DOSE	0,04	3	0,01	29	0,000000
traitement*DOSE	0,02	3	0,01	12	0,000044
Error	0,01	24	0,00		

Tableau 11 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amylopectine

Tukey HSD test; variable Amylopectine (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00041, df = 24,000

Cell No.	traitement	Amylopectine Mean	1	2
2	2	52,43400	****	
1	1	52,50840		****

Tableau 12 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amylopectine

Tukey HSD test; variable Amylopectine (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00041, df = 24,000

Cell No.	DOSE	Amylopectine Mean	1	2
2	2	52,44040	****	
3	3	52,45220	****	
4	4	52,46540	****	
1	1	52,52680		****

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Amylose »

Univariate Tests of Significance for Amylose 20% (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	5506,249	1	5506,249	182348769	0,000000
traitement	0,003	1	0,003	97	0,000000
DOSE	0,002	3	0,001	22	0,000000
traitement*DOSE	0,001	3	0,000	9	0,000356
Error	0,001	24	0,000		

Tableau 14 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur l'amylose

Tukey HSD test; variable Amylose 20% (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00003, df = 24,000

Cell No.	traitement	Amylose 20% Mean	1	2
2	2	13,10801	****	
1	1	13,12710		****

Tableau 15 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur l'amylose

Tukey HSD test; variable Amylose 20% (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00003, df = 24,000

Cell No.	DOSE	Amylose 20% Mean	1	2
2	2	13,11010	****	
3	3	13,11305	****	
4	4	13,11635	****	
1	1	13,13073		****

Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Sucre Totaux »

Univariate Tests of Significance for Sucre Totaux (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Sigma-restricted parameterization
Effective hypothesis decomposition

Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	401,3008	1	401,3008	129323,2	0,000000
traitement	0,0143	1	0,0143	4,6	0,041900
DOSE	0,0164	3	0,0055	1,8	0,181786
traitement*DOSE	0,0104	3	0,0035	1,1	0,360061
Error	0,0745	24	0,0031		

Tableau 17 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les sucres totaux

Tukey HSD test; variable Sucre Totaux (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00310, df = 24,000

Cell No.	traitement	Sucre Totaux Mean	1	2
2	compost	3,520113	****	
1	biochar	3,562444		****

Tableau 18 : Les groupes obtenus de l'effet dose sur les Sucre totaux

Tukey HSD test; variable Sucre Totaux (Parametre de Qualite CHAHD 2025)
Homogenous Groups, alpha = ,05000
Error: Between MS = ,00310, df = 24,000

Cell No.	DOSE	Sucre Totaux Mean	1
2	2	3,517588	****
4	4	3,526350	****
3	3	3,544500	****
1	1	3,576675	****

Tableau 19 : Résultats de l'ANOVA pour le paramètre de qualité « Sucre réducteur »

Effect	Univariate Tests of Significance for Sucre reducteur (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	4412,000	1	4412,000	11690992	0,000000
traitement	0,002	1	0,002	6	0,027142
DOSE	0,010	3	0,003	9	0,000334
traitement*DOSE	0,001	3	0,000	1	0,521278
Error	0,009	24	0,000		

Tableau 20 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet du traitement (biochar, compost) sur les Sucre réducteur

Cell No.	Tukey HSD test; variable Sucre reducteur (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00038, df = 24,000 traitement	Sucre reducteur Mean	1	2
2	compost	11,73394	****	
1	biochar	11,75010		****

Tableau 21 : Résultats du test de Tukey HSD pour l'effet dose (biochar, compost) sur les Sucre réducteur

Cell No.	Tukey HSD test; variable Sucre reducteur (Parametre de Qualite CHAHD 2025) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00038, df = 24,000 DOSE	Sucre reducteur Mean	1	2	3
4	4	11,71800	****		
3	3	11,73173	****	****	
1	1	11,75635		****	****
2	2	11,76200			****