



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

جامعة الشهيد الشاذلي بن جديد - تبسة -

UNIVERSITÉ ECHAHID CHEIKH LARBI TÉBESSI – TÉBESSA–

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

Département Biologie des Êtres Vivants

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de master en

Sciences Biologiques

Spécialité : Production Animale

Thème

**Evaluation de la variabilité de la valeur nutritive d'une
plante fourragère cultivée dans des parcelles amendées
avec des doses croissantes de biochar et compost : cas
du blé fourrager**

Présenté par : SAKER Ali

Le jury :

Présidente :	Pr. Sonia Boudjabi	Professeur	-Université de Tébessa-
Examinatrice :	Dr. Amale Macheroum	MCA	-Université de Tébessa-
Rapporteur :	Dr. Bilal Gherissi	MAA	-Université de Tébessa-

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury pour

l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Je remercie vivement **Madame la Professeure Sonia BOUDJABI**, de l'Université Larbi Tébessi

de Tébessa, pour avoir accepté de présider ce jury. Je lui exprime ma profonde gratitude

pour l'intérêt qu'elle a porté à ce travail ainsi que pour son appréciation.

Mes remerciements les plus respectueux s'adressent à **Monsieur le Docteur Bilal Gherissi**, de

l'Université Larbi Tébessi de Tébessa, pour avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire.

Je le remercie sincèrement pour son encadrement, ses conseils avisés et son

accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes vifs remerciements à **Madame la Professeure Amale MACHEROUM**,

de l'Université Larbi Tébessi de Tébessa, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Je lui suis

reconnaisant(e) pour l'attention portée à ce mémoire et pour ses remarques constructives.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin,

ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'effet de différentes doses de biochar et de compost sur le rendement ainsi que sur la qualité nutritionnelle des grains et des pailles de blé fourrager. Les résultats montrent que les doses faibles à modérées de biochar et de compost n'ont pas un effet sur la majorité des paramètres étudiés tandis que la dose élevée (Bio 3) a entraîné une amélioration très marquée des performances agronomiques.

La biomasse aérienne a présenté une augmentation d'environ 3,6 fois par rapport au témoin. De même, le rendement en grain a présenté une hausse de 266,9. Concernant la production de paille, Bio 3 a également montré les meilleurs résultats avec un rendement atteignant $1197 \pm 101,3$ g/m² contre $326 \pm 60,6$ g/m² chez le témoin. La teneur en matière sèche des pailles s'est augmenté ($98,1 \pm 1,66$ % contre $94,8 \pm 1,24$ % chez le témoin) ce qui prouve une meilleure aptitude à la conservation des fourrages.

Les amendements organiques ont modifié la composition biochimique des grains, un enrichissement minéral (5,74%), en sucres totaux (51,4%), en protéines (6,75%) et une diminution significative de l'amidon ont été observée (18,1 %). Pour les pailles, les traitements ont généré une augmentation de la matière organique (90,4 %), en protéines (7,34 %) et en sucres réducteurs par rapport au témoin ($0,0260 \pm 0,0020$ %).

Globalement, l'application de biochar à forte dose apparaît comme le traitement le plus efficace pour améliorer simultanément la biomasse, le rendement en grains et la production de paille, tout en influençant plusieurs composantes nutritionnelles importantes. Ces résultats soulignent l'importance d'une gestion raisonnée des amendements organiques afin d'optimiser simultanément le rendement agricole, la conservation des fourrages et leur valorisation nutritionnelle en alimentation animale.

Mots-clés : biochar, compost, blé fourrager, rendement, grains, pailles, qualité nutritionnelle, production animale.

Abstract

The objective of this study is to evaluate the effect of different doses of biochar and compost on the yield and nutritional quality of forage wheat grains and straw. The results show that low to moderate doses of biochar and compost had no effect on most of the parameters studied, while the high dose (Bio 3) led to a very marked improvement in agronomic performance.

Above-ground biomass increased by approximately 3.6 times compared to the control. Similarly, grain yield increased by 266.9%. Regarding straw production, Bio 3 also showed the best results, with a yield of 1197 ± 101.3 g/m² compared to 326 ± 60.6 g/m² in the control. The dry matter content of the straw increased ($98.1 \pm 1.66\%$ compared to $94.8 \pm 1.24\%$ in the control), demonstrating better suitability for forage preservation.

The organic amendments altered the biochemical composition of the grains; an increase in mineral content (5.74%), total sugars (51.4%), and protein (6.75%) was observed, along with a significant decrease in starch (18.1%). For straw, the treatments resulted in an increase in organic matter (90.4%), protein (7.34%), and reducing sugars compared to the control ($0.0260 \pm 0.0020\%$).

Overall, the application of high-dose biochar appears to be the most effective treatment for simultaneously improving biomass, grain yield, and straw production, while influencing several important nutritional components. These results highlight the importance of sound management of organic amendments to simultaneously optimize crop yield, forage preservation, and their nutritional value in animal feed.

Keywords: biochar, compost, forage wheat, yield, grains, straw, nutritional quality, animal production.

الملخص

يهدف هذا البحث إلى تقييم تأثير جرعات مختلفة من الفحم الحيوي والسماذ العضوي على المحصول وعلى الجودة الغذائية لحبوب وقش القمح العلف. تظهر النتائج أن الجرعات المنخفضة إلى المتوسطة من الفحم الحيوي والسماذ العضوي لم تؤثر على غالبية المعايير التي تمت دراستها، في حين أن الجرعة العالية (Bio 3) أدت إلى تحسن ملحوظ جدًا في الأداء الزراعي.

وقد زادت الكتلة الحيوية الهوائية بنحو 3.6 أضعاف مقارنةً بالمجموعة الضابطة. وبالمثل، ارتفع محصول الحبوب بنسبة 266.9. فيما يتعلق بإنتاج القش، أظهرت Bio 3 أيضًا أفضل النتائج حيث بلغ المحصول 101.3 ± 1197 جم/م² مقابل 60.6 ± 326 جم/م² في المجموعة الضابطة. ارتفع محتوى المادة الجافة في القش $(1,66 \pm 98,1 \%)$ مقابل $(1,24 \pm 94,8 \%)$ في العينة المرجعية، مما يدل على قدرة أفضل على حفظ الأعلاف.

أدت التعديلات العضوية إلى تغيير التركيب الكيميائي الحيوي للحبوب، حيث لوحظ ارتفاع في المحتوى المعدني $(5,74 \%)$ والسكريات الإجمالية $(51,4 \%)$ والبروتينات $(6,75 \%)$ ، إلى جانب انخفاض ملحوظ في نسبة النشا $(18,1 \%)$. بالنسبة للقش، أدت المعالجات إلى زيادة في المادة العضوية $(90,4 \%)$ ، والبروتينات $(7,34 \%)$ ، والسكريات المختزلة مقارنةً بالمجموعة الضابطة $(0,0020 \pm 0,0260 \%)$.

بشكل عام، يبدو أن استخدام الفحم الحيوي بجرعات عالية هو المعالجة الأكثر فعالية لتحسين الكتلة الحيوية، ومحصول الحبوب، وإنتاج القش في آن واحد، مع التأثير على العديد من المكونات الغذائية المهمة. تؤكد هذه النتائج على أهمية الإدارة الرشيدة للمخصبات العضوية من أجل تحسين المحصول الزراعي، وحفظ الأعلاف، وتعزيز قيمتها الغذائية في تغذية الحيوانات في آن واحد.

الكلمات المفتاحية: البيوشار، الكمبوست، القمح العلفي، المردود، الحبوب، القش، الجودة الغذائية، الإنتاج الحيواني.

Table des matières

Résumé.....	ii
Abstract.....	iii
المخلص.....	iv
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations.....	ix
Introduction.....	1
Chapitre 01. Matériels et méthodes.....	3
1. Généralités sur le blé fourrager.....	4
1.1 Définition du blé fourrager (<i>Triticum durum</i>).....	4
1.2 Importance du blé fourrager dans la production animale.....	4
1.2.1 Valeur nutritionnelle.....	4
1.2.2 Importance économique.....	4
1.2.3 Polyvalence dans l'alimentation animale.....	4
1.2.4 Limites et nécessité de diversification.....	5
2. Effets du biochar et du compost sur la productivité du blé et la santé des sols.....	5
2.1 Effets sur la productivité du blé.....	5
3. Matériel et méthodes.....	6
3.1 Dispositif expérimental.....	6
3.2 Doses des amendements.....	6
3.3 Échantillonnage et objectif de l'étude.....	7
4. Paramètres de production végétale.....	8
4.1 Biomasse sèche (BS) des plantes pour 1 m ²	8
4.2 Rendement en grains (pour 1 m ²).....	8
4.3 Indice de récolte (HI).....	8
4.4. Augmentation (Increase) des paramètres.....	9
5. Analyses physico-chimiques.....	9
5.1 Préparation des échantillons.....	9
5.2 Détermination du taux de cendres.....	9
5.2.1 Mode opératoire.....	9
5.2.2 Calcul du taux de cendres.....	10
5.3 Dosage spectrophotométrique de l'amidon, de l'amylose et de l'amylopectine.....	10
5.3.1 Dosage de l'amidon.....	10
5.3.2 Dosage de l'amylopectine.....	11
5.4 Dosage spectrophotométrique des sucres totaux et des sucres réducteurs.....	11

5.4.1 Dosage des sucres totaux	12
5.4.2 Dosage des sucres réducteurs.....	12
6. Dosage des protéines totaux.....	12
7. Étude statistique	13
Chapitre 02. Résultats et discussion	14
1. Biomasse aérienne	15
2. Indice de récolte (HI)	17
Section 1 : Paramètres biochimiques et de qualité des grains.....	21
1. Rendement en grain	21
2. Matière sèche des grains (MS %).....	23
3. Humidité des grains	25
4. Teneur en cendres et en matière organique.....	27
5. Teneur en amidon et en amylose des grains	29
6. Teneur en amylopectine des grains	32
7. Sucres totaux des grains.....	34
8. Sucres réducteurs des grains	36
9. Protéine des grains	38
Section 2 : Paramètres biochimiques et de qualité des pailles.....	39
1. Rendement en paille	39
2. Matière sèche des pailles (MS %).....	42
3. Humidité des pailles	44
4. Teneur en cendres (matière minérale) et la matière organique	46
5. Teneur en amidon et en amylose des pailles	48
6. Teneur en amylopectine des pailles	51
7. Sucres totaux des pailles	53
8. Sucres réducteurs des pailles	55
9. Protéines des pailles	57
Conclusion et perspectives	60
Références	63

Liste des figures

Figure 1. Variation de la biomasse aérienne (g/m ²) du blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	15
Figure 2. Effet des doses de biochar et de compost sur l'indice de récolte (HI) du blé.....	17
Figure 3. Effet des doses de biochar et de compost sur l'augmentation (%) du rendement en grain du blé	19
Figure 4. Variation du rendement en grain (g/m ²) en fonction des doses de biochar et de compost ...	21
Figure 5. Variation de la teneur en matière sèche (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	23
Figure 6. Variation de la teneur en humidité (%) des grains en fonction des doses de biochar et de compost.....	25
Figure 7. Variation de la teneur en cendres (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost	27
Figure 8. Variation de la matière organique (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost	27
Figure 9. Variation de la teneur en amidon (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost	29
Figure 10. Variation de la teneur en amylose (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost	30
Figure 11. Variation de la teneur en amylopectine (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	32
Figure 12. Variation de la teneur en sucres totaux (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	34
Figure 13. Variation de la teneur en sucres réducteurs (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	36
Figure 14. Variation de la protéines (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	38
Figure 15. Variation du rendement en paille (g/m ²) en fonction des doses de biochar et de compost..	39
Figure 16. Variation du rendement en matière sèche des paille (g/m ²) en fonction des doses de biochar et de compost	40
Figure 17. Variation de la teneur en matière sèche (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	42
Figure 18. Variation de la teneur en humidité (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost	44
Figure 19. Variation de la teneur en cendres (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost	46
Figure 20. Variation de la teneur en amidon (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost	48
Figure 21. Variation de la teneur en amylose (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost	49
Figure 22. Variation de la teneur en amylopectine (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	51
Figure 23. Variation de la teneur en sucres totaux (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	53
Figure 24. Variation de la teneur en sucres réducteurs (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	55
Figure 25. Variation de la protéines (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost.....	57

Liste des tableaux

Tableau 1. Doses du biochar et du compost utilisé dans les traitements expérimentaux	6
Tableau 2. Caractéristiques physicochimiques du sol, du biochar et du compost utilisés dans l'expérimentation.....	7

Liste des abréviations

% : Pourcentage

ADF : Acid Detergent Fiber (fibres au détergent acide)

ANOVA : Analyse de variance

Bio : Biochar

Co : Compost

g/m² : Gramme par mètre carré

HI : Indice de récolte (Harvest Index)

MM : Matière minérale (cendres)

MO : Matière organique

MS : Matière sèche

NDF : Neutral Detergent Fiber (fibres au détergent neutre)

p : Probabilité statistique

T' : Témoin

Test de Tukey : Test statistique de comparaison multiple

UFL : Unité fourragère lait

Introduction

Introduction

L'amélioration de la productivité agricole et de la qualité des ressources fourragères constitue un enjeu majeur dans les systèmes de production intégrés agriculture-élevage, en particulier dans les zones semi-arides où les contraintes édapho-climatiques limitent la disponibilité des ressources alimentaires pour les animaux (Herrero *et al.*, 2010).

Le blé fourrager occupe une place importante en alimentation animale, en fournissant à la fois des grains riches en énergie et des pailles utilisées comme source de fibres (Tilman *et al.*, 2011). Cependant, la productivité et la qualité nutritionnelle de ces ressources dépendent fortement des pratiques de fertilisation et de la gestion de la fertilité des sols (Cassman *et al.*, 2003), notamment dans les conditions méditerranéennes où la fertilisation organique peut améliorer significativement les rendements et la qualité des cultures (Leogrande *et al.*, 2024).

L'utilisation d'amendements organiques tels que le compost et le biochar apparaît comme une stratégie prometteuse pour améliorer la fertilité des sols, la productivité des cultures et la durabilité des systèmes agricoles (Lehmann et Joseph, 2015 ; Biederman et Harpole, 2013). Le compost est reconnu pour sa richesse en éléments nutritifs directement disponibles, sa capacité à améliorer la structure du sol et à stimuler l'activité microbienne, favorisant ainsi la croissance des plantes et l'accumulation de biomasse (Agegnehu *et al.*, 2017).

De nombreuses études ont montré que l'application de compost peut améliorer significativement le rendement des cultures céréalières, notamment en conditions méditerranéennes (Leogrande *et al.*, 2024). Le biochar, quant à lui, est un matériau carboné issu de la pyrolyse de biomasses organiques, caractérisé par une forte stabilité et une structure poreuse qui lui confèrent des propriétés intéressantes pour l'amélioration des sols (Lehmann *et al.*, 2011 ; Liu *et al.*, 2013). Son incorporation permet d'augmenter la capacité de rétention en eau, la disponibilité des nutriments et la stabilité structurale du sol (Lehmann et Joseph, 2015). Toutefois, les effets du biochar sur les cultures restent variables et dépendent des doses appliquées et des conditions du milieu (Liu *et al.*, 2013).

Au-delà de la productivité, la qualité nutritionnelle des produits végétaux constitue un facteur déterminant dans les systèmes d'élevage, influençant directement les performances animales et l'efficacité alimentaire (Svihus *et al.*, 2005). Les grains de blé fourrager représentent une source majeure d'énergie, principalement sous forme d'amidon, dont la structure et la digestibilité conditionnent leur valeur nutritive (Svihus *et al.*, 2005). Par ailleurs, les pailles jouent un rôle

essentiel en tant que source de fibres nécessaires au bon fonctionnement du rumen (Van Soest, 1994).

Cependant, malgré l'intérêt croissant pour les amendements organiques, les effets combinés du biochar et du compost sur le rendement et la qualité du blé fourrager restent encore insuffisamment étudiés, en particulier lorsqu'on considère simultanément les grains et les pailles dans une perspective de production animale (Jeffery *et al.*, 2011 ; Biederman et Harpole, 2013). De plus, les résultats disponibles dans la littérature sont parfois contradictoires, notamment en ce qui concerne l'impact de ces amendements sur la composition biochimique des cultures et la répartition des assimilats dans la plante (Liu *et al.*, 2013 ; Poorter *et al.*, 2015).

Par ailleurs, une augmentation du rendement ou de la biomasse ne se traduit pas nécessairement par une amélioration de la qualité nutritionnelle, en raison notamment de l'effet de dilution des nutriments dans les tissus végétaux, ce qui soulève la question de l'efficacité réelle de ces pratiques dans les systèmes intégrés agriculture élevage (Jarrell et Beverly, 1981).

Dans ce contexte, il apparaît essentiel d'évaluer l'effet de l'application de biochar et de compost, à différentes doses, sur le rendement et la qualité nutritionnelle des grains et des pailles de blé fourrager, ainsi que leur potentiel de valorisation en alimentation animale. L'hypothèse générale de ce travail repose sur le fait que les amendements organiques, en particulier à doses élevées, peuvent améliorer la productivité du blé fourrager et la qualité des produits obtenus. Il est également supposé que le compost agit sur la composition des grains, tandis que le biochar influence davantage la biomasse et la répartition des assimilats dans la plante.

Aussi, l'évaluation de la qualité des pailles de blé fourrager apparaît essentielle pour mieux apprécier leur valeur nutritive et leur valorisation en alimentation animale. L'étude de l'influence des amendements organiques sur ces fractions fibreuses pourrait permettre d'optimiser le compromis entre production de biomasse et qualité alimentaire dans les systèmes intégrés agriculture-élevage.

Chapitre 01.

Matériels et méthodes

1. Généralités sur le blé fourrager

1.1 Définition du blé fourrager (*Triticum durum*)

Le blé fourrager (*Triticum durum*) est une céréale importante dans l'agriculture et dans la nutrition animale. Il se caractérise par des grains durs et vitreux ainsi que par une richesse en amidon (allant jusqu'à 65%), mais aussi en protéines par rapport aux autres types de blé (une teneur généralement comprise entre 12 et 14 %). Grâce à ces caractéristiques, il constitue une ressource importante aussi bien pour l'alimentation humaine que pour l'alimentation animale (Dupont et Simon, 2010 ; FAO, 2018 ; Shewry, 2009).

1.2 Importance du blé fourrager dans la production animale

1.2.1 Valeur nutritionnelle

Le blé fourrager possède une valeur nutritionnelle élevée, car il contient plusieurs nutriments essentiels tels que l'amidon, les protéines, les vitamines et les minéraux, nécessaires à la santé et au développement des animaux (Mohammadi et Haghparast, 2022). Sa teneur élevée en énergie et en protéines joue un rôle important dans le développement musculaire des animaux de boucherie, ce qui contribue à améliorer la croissance et la productivité globale des animaux (McDonald *et al.*, 2011 ; Preston et Leng, 1987).

1.2.2 Importance économique

Le blé fourrager présente également une grande importance économique dans le secteur agricole. En effet, son prix sur le marché est souvent 10 à 20 % plus élevé que celui du blé tendre, ce qui encourage les agriculteurs à privilégier sa culture (Tidiane Sall *et al.*, 2019). De plus, cette culture constitue une source de revenu importante pour les petits agriculteurs, notamment dans certaines régions comme l'Afrique subsaharienne, où elle contribue à la sécurité alimentaire et à la stabilité économique des exploitations agricoles (Tidiane Sall *et al.*, 2019).

1.2.3 Polyvalence dans l'alimentation animale

Le blé fourrager est également apprécié pour sa polyvalence dans l'alimentation animale. Il peut être utilisé sous différentes formes, notamment la semoule et la farine, qui sont facilement incorporées dans les rations alimentaires des animaux (McDonald *et al.*, 2011 ; INRA, 2018).

Ces formes fournissent de l'énergie et des nutriments essentiels nécessaires à leur croissance et à leur performance (Liu *et al.*, 1996).

En outre, le blé fourrager possède une bonne adaptabilité aux différents climats, ce qui permet une production relativement stable et garantit une source fiable d'aliments pour le bétail (Peters Haugrud *et al.*, 2025).

1.2.4 Limites et nécessité de diversification

Malgré ses nombreux avantages, la dépendance à une seule culture comme le blé fourrager peut fragiliser les systèmes alimentaires, notamment face aux changements climatiques et aux fluctuations du marché. Pour cette raison, la diversification des sources alimentaires est recommandée afin d'améliorer la résilience et la durabilité de la production animale (FAO, 2013 ; Tilman *et al.*, 2011 ; Herrero *et al.*, 2010).

2. Effets du biochar et du compost sur la productivité du blé et la santé des sols

L'utilisation du biochar et du compost comme amendements organiques du sol a montré des résultats prometteurs pour l'amélioration de la productivité du blé et de la santé des sols (Lehmann et Joseph, 2015 ; Agegnehu *et al.*, 2017 ; Jeffery *et al.*, 2011). Ces amendements contribuent à augmenter la fertilité des sols, à améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol et à favoriser une agriculture plus durable (Khan *et al.*, 2022; Hasan *et al.*, 2024).

Des recherches montrent que la combinaison du biochar et du compost, notamment lorsqu'elle est associée à des engrais inorganiques, peut stimuler la croissance des cultures et améliorer le rendement du blé. Cette approche permet également d'augmenter la rétention des nutriments dans le sol et de réduire certains impacts environnementaux, contribuant ainsi à une gestion plus durable des systèmes agricoles (Ain *et al.*, 2023).

2.1 Effets sur la productivité du blé

Plusieurs études ont démontré que l'intégration du biochar et du compost dans les pratiques agricoles peut améliorer significativement la production du blé. L'association du biochar, du lombricompost et d'engrais inorganiques a permis d'augmenter la production de grains de blé de 43,23 % à 79,48 %, ce qui souligne le potentiel de ces amendements comme alternative partielle aux engrais chimiques dans une agriculture durable (Hasan *et al.*, 2024).

Dans un système de culture riz–blé, l’application combinée de biochar et de compost a amélioré plusieurs caractéristiques agronomiques, notamment le poids des grains et le rendement biologique, avec des résultats comparables à ceux obtenus avec des engrais commerciaux (Ain *et al.*, 2023).

Par ailleurs, l’utilisation du biochar en combinaison avec des consortiums microbiens a permis d’augmenter le rendement en grains de blé de 6,8 % à 13,6 %, tout en améliorant la qualité technologique des grains grâce à l’amélioration des propriétés viscoélastiques de la pâte (Caldara *et al.*, 2024).

De plus, l’application de biochar associée à des engrais azotés a montré une amélioration significative de la teneur en protéines et du rendement des grains de blé, indiquant une meilleure efficacité d’utilisation de l’azote par la culture (Khan *et al.*, 2022).

3. Matériel et méthodes

3.1 Dispositif expérimental

L’expérimentation a consisté à semer des grains de blé fourrager (*Triticum durum*) dans des parcelles de sol d’une surface de 1 m², amendées avec différentes doses croissantes de biochar et de compost. Ces traitements ont été appliqués afin d’évaluer l’effet de ces amendements organiques sur la qualité des grains et des résidus de culture. Un traitement témoin sans amendement a également été inclus pour permettre la comparaison des résultats.

3.2 Doses des amendements

Tableau 1. Doses du biochar et du compost utilisé dans les traitements expérimentaux

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

Ces différentes doses ont été appliquées afin d’analyser l’influence progressive des

amendements sur les paramètres agronomiques et la qualité des produits récoltés.

Les caractéristiques physicochimiques du sol ainsi que des amendements organiques utilisés (biochar et compost) ont été déterminées avant le début de l'expérimentation. Les résultats de ces analyses sont regroupés dans le Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques physicochimiques du sol, du biochar et du compost utilisés dans l'expérimentation.

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
Conductivité électrique (CE)	(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	—

3.3 Échantillonnage et objectif de l'étude

À la fin de l'expérimentation, les grains de blé fourrager récoltés ont été prélevés pour réaliser plusieurs analyses visant à déterminer certains paramètres de qualité. Parmi les paramètres étudiés figurent :

- la biomasse sèche,
- le rendement en grains et en paille,
- l'indice de récolte (HI),
- l'augmentation (Increase) en rendement,
- le taux de cendres,
- la teneur en amidon,
- la teneur en amylose et amylopectine,
- les sucres totaux,
- les sucres réducteurs,
- les protéines
- ainsi que le pourcentage de matière organique dans le blé.

Cette étude avait pour objectif principal d'évaluer l'effet des amendements organiques

(biochar et compost) sur les paramètres agronomiques et la qualité nutritionnelle des grains et de la paille du blé récolté, notamment la biomasse, le rendement, l'indice de récolte (HI) ainsi que la composition biochimique, en vue de leur valorisation potentielle dans l'alimentation animale.

4. Paramètres de production végétale

4.1 Biomasse sèche (BS) des plantes pour 1 m²

Pour évaluer la biomasse sèche des plantes (blé) à un stade de maturité avancée, les plantes sont récoltées lorsque les feuilles jaunissent et que les grains deviennent durs et secs. À ce stade, les plantes entières, y compris les épis et les grains, sont coupées puis séchées jusqu'à poids constant avant d'être pesées.

La biomasse sèche est ensuite exprimée en kg/m², en rapportant le poids total à la surface récoltée (1 m²). Cette mesure permet d'estimer la production totale de matière végétale et de comparer l'effet des traitements ou conditions de culture.

4.2 Rendement en grains (pour 1 m²)

Le rendement a été évalué à maturité complète, lorsque les plantes étaient jaunies et que les grains étaient durs et secs. Les plantes ont été récoltées sur une surface de 1 m², puis séparées en deux fractions : les grains et la paille (parties végétatives comprenant les tiges et les feuilles). Les grains ont été battus, nettoyés et séchés si nécessaire avant d'être pesés, tandis que la paille a été séchée jusqu'à poids constant puis pesée séparément. Le rendement en grains, exprimé en g/m², représente la production utile de la culture, alors que le rendement en paille, également exprimé en g/m², correspond à la biomasse végétative produite.

4.3 Indice de récolte (HI)

L'indice de récolte (Harvest Index, HI) a été déterminé afin d'évaluer l'efficacité de la plante à convertir la biomasse totale en production de grains. Il est calculé comme le rapport entre le rendement en grains et la biomasse sèche totale produite par unité de surface (1 m²), selon la formule suivante (Hay, 1995 ; Sadras et Calderini, 2021) :

$$\textbf{HI} = \text{rendement en grains} / \text{biomasse sèche totale.}$$

Un indice de récolte élevé traduit une meilleure allocation des assimilats vers les grains et

donc une efficacité accrue de la plante à produire un rendement utile.

4.4. Augmentation (Increase) des paramètres

L'augmentation (Increase) des paramètres a été calculée afin de comparer l'effet des différents traitements sur la biomasse, le rendement et l'indice de récolte (HI). Elle est exprimée en pourcentage par rapport au témoin, selon la formule suivante (Steel et Torrie, 1980 ; Gomez et Gomez, 1984 ; Cassman *et al.*, 2003) :

$$\text{Increase (\%)} = [(valeur du traitement - valeur du témoin) / valeur du témoin] \times 100.$$

Ce paramètre permet d'évaluer l'impact des facteurs étudiés, tels que la fertilisation, l'irrigation ou les conditions de stress, sur la productivité des cultures. Les valeurs positives de l'Increase (%) indiquent une amélioration du paramètre étudié par rapport au témoin, tandis que les valeurs négatives traduisent une diminution de ce paramètre sous l'effet du traitement.

5. Analyses physico-chimiques

5.1 Préparation des échantillons

Afin de réaliser les différentes analyses, les grains de blé prélevés ont été préparés par broyage. Dans un premier temps, les grains ont été écrasés manuellement à l'aide d'un mortier, puis ils ont été finement broyés à l'aide d'un broyeur électrique jusqu'à l'obtention d'une poudre homogène et fine.

Cette préparation des échantillons a permis de faciliter la réalisation des analyses physico-chimiques nécessaires à l'évaluation de la qualité des grains.

5.2 Détermination du taux de cendres

5.2.1 Mode opératoire

La détermination du taux de cendres a été réalisée par incinération selon la méthode décrite par CIBE (2018). Pour chaque traitement, 2 g d'échantillon broyé ont été placés dans des creusets en porcelaine préalablement nettoyés, séchés et pesés.

Les creusets contenant les échantillons ont ensuite été introduits dans un four à moufle réglé à 550 °C pendant une durée de 4 heures afin d'assurer la combustion complète de la matière

organique.

À la fin de l'incinération, les creusets ont été retirés à l'aide de pinces métalliques, puis placés dans un dessiccateur afin de les laisser refroidir avant la pesée finale. Chaque analyse a été réalisée en cinq répétitions afin d'assurer la fiabilité des résultats.

5.2.2 Calcul du taux de cendres

Le taux de cendres est déterminé à l'aide de la formule suivante :

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

où :

- P_0 : masse du creuset vide (g)
- P_1 : masse du creuset contenant l'échantillon avant incinération (g)
- P_2 : masse du creuset contenant les cendres après incinération (g)

5.3 Dosage spectrophotométrique de l'amidon, de l'amylose et de l'amylopectine

5.3.1 Dosage de l'amidon

Préparation de l'échantillon à analyser

Pour l'analyse, 0,1 g de farine du matériel biologique finement broyé ($\varphi \approx 0,5$ mm) est prélevé. À cet échantillon, on ajoute 5 ml de KOH 1N afin de solubiliser l'amidon.

La solution est ensuite 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 que la solution est neutre.

Le mélange est ensuite chauffé au bain-marie en ébullition pendant 15 minutes afin de favoriser l'extraction complète de l'amidon. Le volume est ensuite ajusté à 10 ml, puis le mélange est centrifugé. Le surnageant est récupéré et filtré si nécessaire, puis utilisé pour le dosage de l'amidon.

Dosage de l'amidon dans l'échantillon

Pour le dosage, 0,05 ml de l'extrait est prélevé et mélangé avec 4,85 ml d'eau distillée, puis

0,1 ml de réactif I₂/KI est ajouté.

Le mélange est incubé pendant 10 minutes avant la lecture des densités optiques au spectrophotomètre.

Les absorbances sont mesurées à :

- 580 nm pour l'amidon total,
- 720 nm pour l'amylopectine.

Les mesures sont réalisées en triplet afin d'assurer la précision des résultats.

La teneur en amidon est ensuite déterminée à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$Y = 0.0961x + 0.003 \text{ (R}^2 = 0.9944\text{)}$$

où y représente l'absorbance mesurée au spectrophotomètre et x la concentration en amidon. La concentration de l'amidon dans les échantillons est ainsi déterminée à partir de cette équation en utilisant les valeurs d'absorbance obtenues expérimentalement.

5.3.2 Dosage de l'amylopectine

Les mêmes échantillons utilisés pour le dosage de l'amidon sont ensuite analysés pour déterminer la teneur en amylopectine. La lecture spectrophotométrique est réalisée à une longueur d'onde de 720 nm.

La concentration en amylopectine est calculée à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$Y = 0.0581x - 0.0043 \text{ (R}^2 = 0.9851\text{)}$$

L'amylose représente environ 20 % de l'amidon total présent dans le grain. Par conséquent, sa teneur est déduite à partir des valeurs obtenues lors du dosage de l'amidon.

5.4 Dosage spectrophotométrique des sucres totaux et des sucres réducteurs

Pour l'extraction des sucres, 1 g de farine de chaque échantillon est dispersé dans 10 ml de DMSO à 25 % (v/v). Le mélange est ensuite placé dans un bain-marie bouillant pendant 15 minutes afin de favoriser l'extraction des sucres.

Après incubation, 0,1 ml du mélange obtenu est dilué dans 9,9 ml d'eau distillée afin d'obtenir une solution homogène prête pour les analyses spectrophotométriques.

5.4.1 Dosage des sucres totaux

Pour la détermination des sucres totaux, 0,5 ml de la solution diluée est prélevé, auquel on ajoute 0,5 ml de phénol à 5 %. Après homogénéisation, 2 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4) à 75 % sont ajoutés au mélange.

La solution est ensuite incubée au bain-marie, puis l'absorbance est mesurée au spectrophotomètre à une longueur d'onde de 500 nm.

La concentration des sucres totaux est calculée à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$Y = 0,0004x + 0,1381$$

5.4.2 Dosage des sucres réducteurs

La détermination des sucres réducteurs est réalisée selon une procédure similaire. 0,1 ml de la solution préparée dans le DMSO est mélangé avec 0,4 ml d'eau distillée, puis 1 ml de réactif DNS (acide dinitrosalicylique) est ajouté.

Après incubation, l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 546 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Comme pour les sucres totaux, chaque analyse est effectuée en cinq répétitions.

La teneur en sucres réducteurs est calculée à partir de la courbe d'étalonnage suivante :

$$Y = 0,001x + 0,1168$$

6. Dosage des protéines totaux

Le dosage des protéines totales a été réalisé selon la méthode de Bradford (1976), basée sur la liaison des protéines au Bleu Brillant de Coomassie G-250 et la mesure de l'absorbance à 595 nm. Une quantité de 50 mg de poudre sèche a été homogénéisée dans 2 mL de tampon phosphate salin (PBS), puis incubée à 4 °C pendant 1 heure. L'extrait a ensuite été centrifugé à 15 000 g pendant 15 minutes, et 100 µL du surnageant ont été mélangés avec 2 mL du réactif de Bradford. Après une incubation de 5 minutes, l'absorbance a été mesurée au

spectrophotomètre à 595 nm dans un délai n'excédant pas une heure. Le réactif de Bradford a été préparé en dissolvant 200 mg de Bleu Brillant de Coomassie G-250 dans 100 mL d'éthanol à 95 %, puis en ajoutant 200 mL d'acide orthophosphorique à 86 %, suivi d'une filtration. Le tampon PBS (pH 7,4) a été préparé en dissolvant 2,4 g de NaCl, 0,06 g de KCl, 0,43 g de Na_2HPO_4 et 0,072 g de KH_2PO_4 dans 300 mL d'eau distillée, puis le pH a été ajusté si nécessaire à l'aide de HCl 1 M ou de NaOH 1 M.

7. Étude statistique

L'ensemble des résultats obtenus a été soumis à une analyse statistique descriptive, incluant le calcul des moyennes et des écarts-types. Par la suite, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée en prenant en compte deux facteurs principaux : le type de traitement (amendement) et les doses appliquées.

Les différences entre les résultats ont été considérées comme statistiquement significatives pour une valeur de $P < 0,05$. Afin d'identifier les différences entre les moyennes des différents traitements, l'analyse statistique a été complétée par un test post-hoc de Tukey (HSD). Ce test a permis d'effectuer des comparaisons multiples entre les différentes doses de biochar et de compost, tout en tenant compte des interactions entre les deux facteurs étudiés, à savoir le type d'amendement et les doses appliquées.

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Jamovi (version 2.6.25).

Chapitre 02. Résultats et discussion

1. Biomasse aérienne

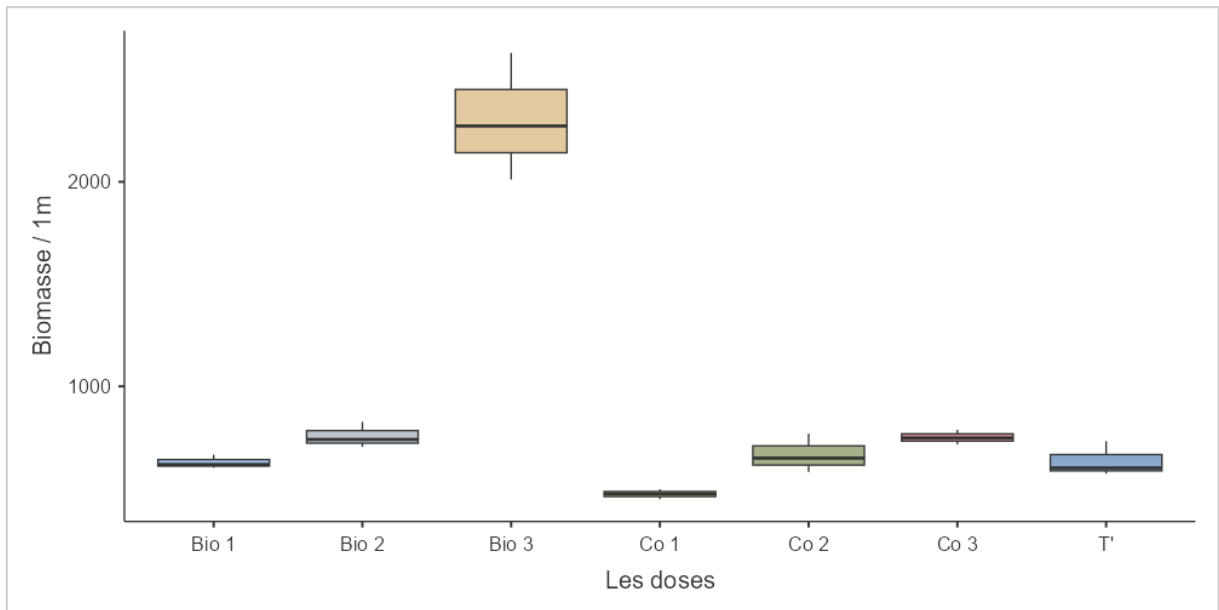


Figure 1. Variation de la biomasse aérienne (g/m²) du blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la biomasse produite par m² varie en fonction des doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a enregistré une biomasse moyenne de $635 \pm 84,9$ g/m². L'analyse statistique réalisée à l'aide du test de Tukey n'a révélé aucune différence significative entre le témoin et les traitements Bio 1 ($629 \pm 33,1$ g/m²), Bio 2 ($757 \pm 63,1$ g/m²), Co 1 ($473 \pm 24,5$ g/m²), Co 2 ($666 \pm 95,0$ g/m²) et Co 3 ($751 \pm 36,0$ g/m²), avec une valeur de p supérieure à 0,05. En revanche, une différence hautement significative a été observée pour le traitement Bio 3, qui a présenté une biomasse moyenne de $2305 \pm 310,7$ g/m², soit une augmentation d'environ 3,6 fois par rapport au témoin, avec une valeur de p inférieure à 0,001. Ces résultats indiquent que seule l'application d'une dose élevée de biochar a permis d'améliorer significativement la production de biomasse, tandis que les autres doses de biochar ainsi que les apports de compost n'ont pas induit de modification notable.

L'absence d'effet significatif observée pour les doses faibles et moyennes peut s'expliquer par une quantité insuffisante de biochar pour modifier de manière significative les propriétés du sol. En effet, plusieurs travaux ont montré que les effets du biochar sont fortement dépendants de la dose appliquée et des caractéristiques du sol, notamment sa fertilité initiale et sa texture. Lehmann et Joseph (2015) indiquent que le biochar améliore la capacité de rétention

en eau et la disponibilité des nutriments, mais que ces effets deviennent réellement significatifs à des doses élevées. Dans le même sens, Jeffery *et al.* (2011) ont montré, que l'application de biochar peut augmenter la productivité des cultures, mais que cet effet reste variable et dépend fortement des conditions expérimentales (Liu *et al.*, 2013 ; Agegnehu *et al.*, 2017). De plus, Biederman et Harpole (2013) ont confirmé que le biochar entraîne en moyenne une augmentation de la biomasse végétale, particulièrement dans les sols pauvres, ce qui pourrait expliquer la forte réponse observée avec la dose Bio 3.

L'absence d'effet significatif du compost dans cette étude pourrait être liée à la libération progressive des éléments nutritifs issus de la minéralisation de la matière organique. En effet, le compost agit généralement à moyen et long terme en améliorant la structure du sol et son activité biologique, ce qui peut expliquer l'absence de réponse immédiate sur la biomasse (Bernal *et al.*, 2009 ; Diacono et Montemurro, 2010).

L'augmentation importante de la biomasse observée avec la dose élevée de biochar constitue un avantage majeur, car elle permet d'accroître la disponibilité en paille et en matière sèche destinées à l'alimentation des ruminants. Cependant, une biomasse élevée ne signifie pas nécessairement une meilleure qualité nutritionnelle. Une croissance végétative accrue peut entraîner une augmentation de la teneur en fibres structurales, notamment la lignine, ce qui réduit la digestibilité et la valeur énergétique du fourrage. Van Soest (1994) souligne que la digestibilité des fourrages est fortement liée à leur composition en fibres, tandis que Chan et Xu (2009) indiquent que l'amélioration du rendement par le biochar n'est pas toujours accompagnée d'une amélioration de la qualité nutritive (Spokas *et al.*, 2012).

2. Indice de récolte (HI)

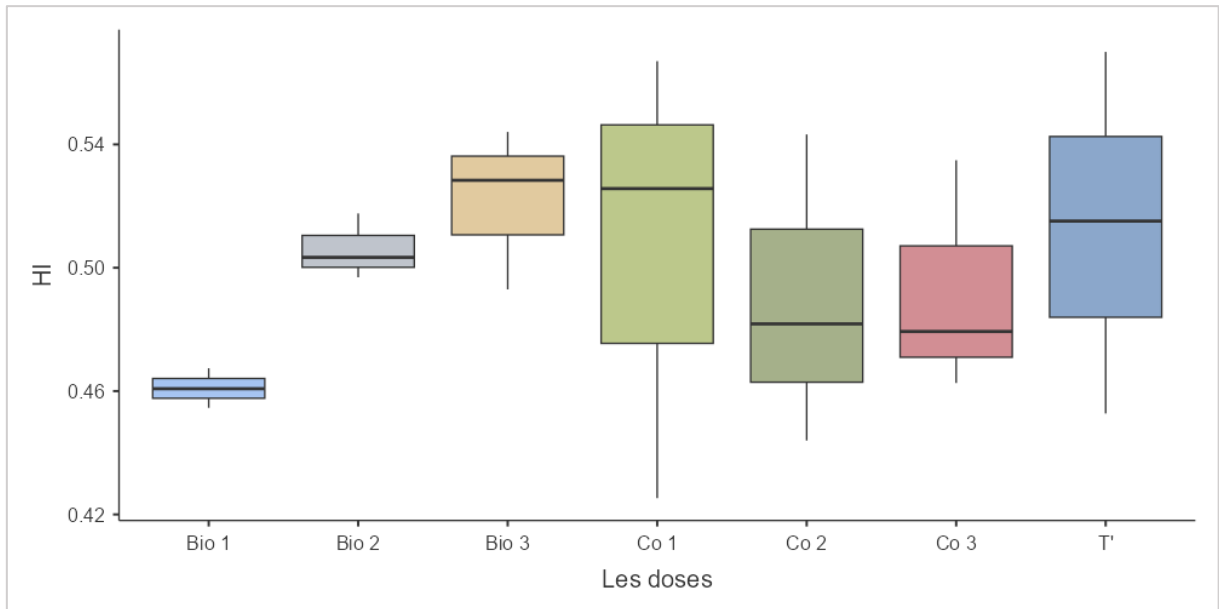


Figure 2. Effet des doses de biochar et de compost sur l'indice de récolte (HI) du blé

Les résultats obtenus montrent que l'indice de récolte (HI) n'a pas été significativement influencé par les différentes doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une valeur moyenne de $0,513 \pm 0,05867$, tandis que les traitements Bio 1 ($0,461 \pm 0,00642$), Bio 2 ($0,506 \pm 0,01059$), Bio 3 ($0,522 \pm 0,02615$), Co 1 ($0,506 \pm 0,07289$), Co 2 ($0,490 \pm 0,05010$) et Co 3 ($0,492 \pm 0,03781$) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin selon le test de Tukey, avec une valeur de p supérieure à 0,05. Ces résultats indiquent que, malgré les variations observées au niveau de la biomasse totale, la proportion de biomasse allouée aux grains par rapport à la biomasse totale est restée relativement constante entre les différents traitements.

Cette stabilité de l'indice de récolte suggère que les amendements appliqués n'ont pas modifié la répartition des assimilats entre les organes végétatifs et reproducteurs. En effet, même si certaines doses de biochar, notamment Bio 3, ont entraîné une augmentation significative de la biomasse totale, cette augmentation semble avoir été distribuée de manière proportionnelle entre les différentes parties de la plante, sans favoriser spécifiquement l'accumulation de matière sèche dans les grains. Ce comportement est cohérent avec les observations rapportées dans plusieurs études, où le biochar améliore la croissance globale des plantes sans nécessairement modifier l'indice de récolte. Par exemple, Jeffery *et al.* (2011) ont montré que l'application de biochar peut augmenter le rendement global, mais que son effet sur

la partition de la biomasse reste limité (Biederman et Harpole, 2013 ; Agegnehu *et al.*, 2017). De même, Liu *et al.* (2013) ont observé que l'indice de récolte du blé reste généralement stable malgré des améliorations significatives de la biomasse sous l'effet d'amendements organiques (Lehmann et Joseph, 2015).

L'absence d'effet significatif du compost sur l'indice de récolte peut également s'expliquer par son mode d'action progressif sur la fertilité du sol. Le compost améliore principalement les propriétés biologiques et structurales du sol, mais son influence sur la répartition des assimilats dépend de nombreux facteurs, notamment les conditions environnementales et le stade de développement de la plante (Bernal *et al.*, 2009 ; Diacono et Montemurro, 2010).

La stabilité de l'indice de récolte présente un intérêt important, car elle signifie que toute augmentation de la biomasse totale se traduit également par une augmentation proportionnelle de la paille, qui constitue une ressource essentielle pour l'alimentation des ruminants. Cette situation est particulièrement avantageuse dans les systèmes mixtes où la production de grains et de fourrages est recherchée simultanément. En effet, une augmentation de la biomasse sans modification de l'indice de récolte permet d'accroître la disponibilité en résidus de culture sans compromettre la production de grains. Toutefois, comme mentionné précédemment, la qualité de cette paille doit être évaluée, car une augmentation de la biomasse peut s'accompagner d'une élévation de la teneur en fibres, ce qui peut limiter sa digestibilité (Van Soest, 1994 ; Jung et Allen, 1995).

Ces résultats sont également en accord avec les travaux de Poorter *et al.* (2015), qui ont montré que l'indice de récolte est un paramètre relativement stable, fortement contrôlé par des facteurs génétiques et physiologiques, et moins sensible aux variations environnementales ou aux pratiques culturales que la biomasse totale (Sinclair, 1998).

3. Augmentation du rendement en grain (Increase G %)

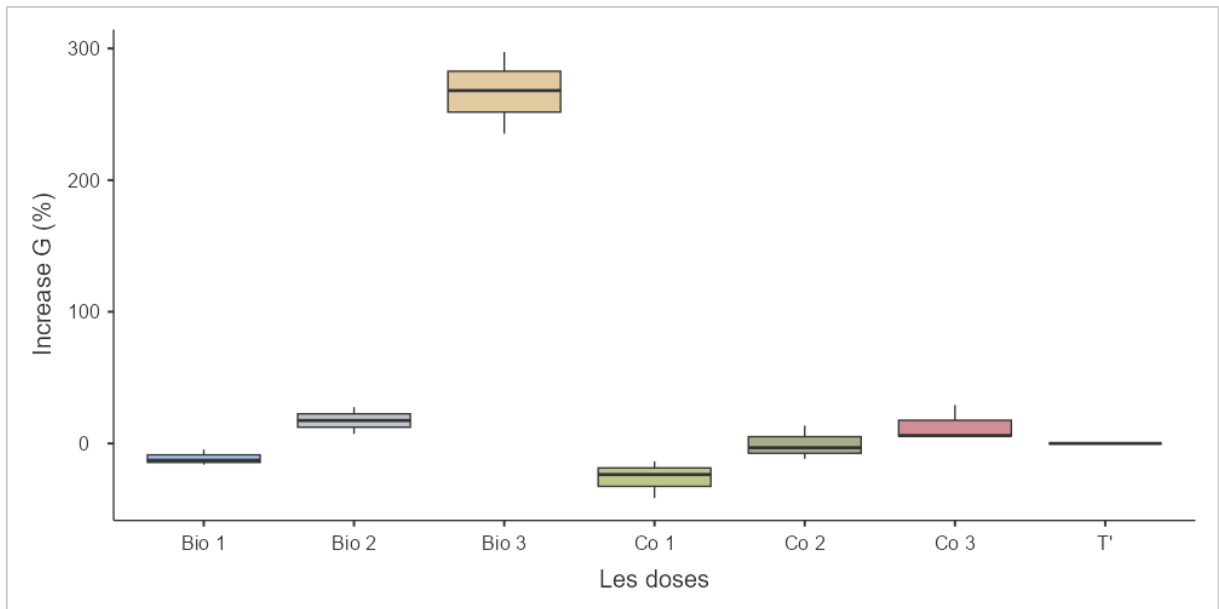


Figure 3. Effet des doses de biochar et de compost sur l'augmentation (%) du rendement en grain du blé

Les résultats obtenus montrent que le pourcentage d'augmentation du rendement en grain varie fortement selon les doses de biochar et de compost appliqué, en comparaison avec le témoin fixé à 0 %. Les traitements Bio 1 ($-11,15 \pm 5,90$ %), Co 1 ($-26,24 \pm 14,17$ %) et Co 2 ($-0,45 \pm 12,83$ %) ont présenté des valeurs négatives, traduisant une diminution du rendement en grain par rapport au témoin, bien que ces variations ne soient pas toutes statistiquement significatives. Les traitements Bio 2 ($17,42 \pm 10,17$ %) et Co 3 ($13,47 \pm 13,60$ %) ont montré une augmentation du rendement, mais celle-ci reste non significative ($p > 0,05$). En revanche, la dose Bio 3 se distingue nettement avec une augmentation très importante et hautement significative du rendement en grain, atteignant $266,90 \pm 31,04$ % par rapport au témoin ($p < 0,001$), indiquant un effet fortement positif du biochar à forte dose sur la production.

La diminution du rendement observée pour certaines doses faibles ou modérées de biochar et de compost peut s'expliquer par un déséquilibre temporaire dans la disponibilité des nutriments ou par des interactions défavorables dans le sol, notamment une immobilisation de l'azote ou une modification du pH. Plusieurs études ont montré que le biochar, à faible dose, peut parfois entraîner des effets neutres ou négatifs à court terme, en particulier lorsque les conditions du sol ne sont pas favorables ou lorsque les apports ne sont pas suffisants pour induire des améliorations significatives (Liu *et al.*, 2013 ; Spokas *et al.*, 2012 ; Clough *et al.*, 2013). De même, le compost peut nécessiter un certain temps pour libérer les nutriments assimilables, ce qui peut limiter son effet immédiat sur le rendement des cultures (Bernal *et al.*,

2009 ; Diacono et Montemurro, 2010).

Les augmentations non significatives observées pour les traitements Bio 2 et Co 3 suggèrent que des doses intermédiaires peuvent améliorer partiellement la production de grains, mais que ces effets restent variables et dépendants des conditions expérimentales. Cette variabilité a également été rapportée par Jeffery *et al.* (2011), qui ont montré que l'effet du biochar sur le rendement peut être positif mais hétérogène, en fonction du type de sol, du climat et des pratiques culturales (Biederman et Harpole, 2013 ; Agegnehu *et al.*, 2017). En revanche, l'augmentation très importante du rendement observée avec la dose Bio 3 confirme que des apports élevés de biochar peuvent améliorer de manière significative la fertilité du sol, notamment en augmentant la rétention en eau, la disponibilité des nutriments et l'activité microbienne, ce qui favorise à la fois la croissance végétative et la formation des grains (Lehmann et Joseph, 2015 ; Glaser *et al.*, 2002).

Ces résultats présentent un intérêt majeur, car une augmentation importante du rendement en grain s'accompagne généralement d'une augmentation de la biomasse totale et donc de la production de paille, ressource essentielle pour l'alimentation des ruminants. Une meilleure productivité des cultures permet ainsi d'optimiser l'utilisation des terres agricoles en produisant simultanément des grains et des résidus valorisables en alimentation animale. Toutefois, les traitements ayant entraîné une diminution ou une absence d'amélioration du rendement pourraient limiter la disponibilité globale en ressources alimentaires, tant en grains qu'en fourrages. Par ailleurs, comme souligné dans la littérature, l'augmentation du rendement ne s'accompagne pas toujours d'une amélioration de la qualité nutritionnelle des produits, ce qui nécessite des analyses complémentaires pour évaluer la valeur alimentaire réelle des grains et de la paille (Chan et Xu, 2009 ; Van Soest, 1994 ; Spokas *et al.*, 2012).

Section 1 : Paramètres biochimiques et de qualité des grains

1. Rendement en grain

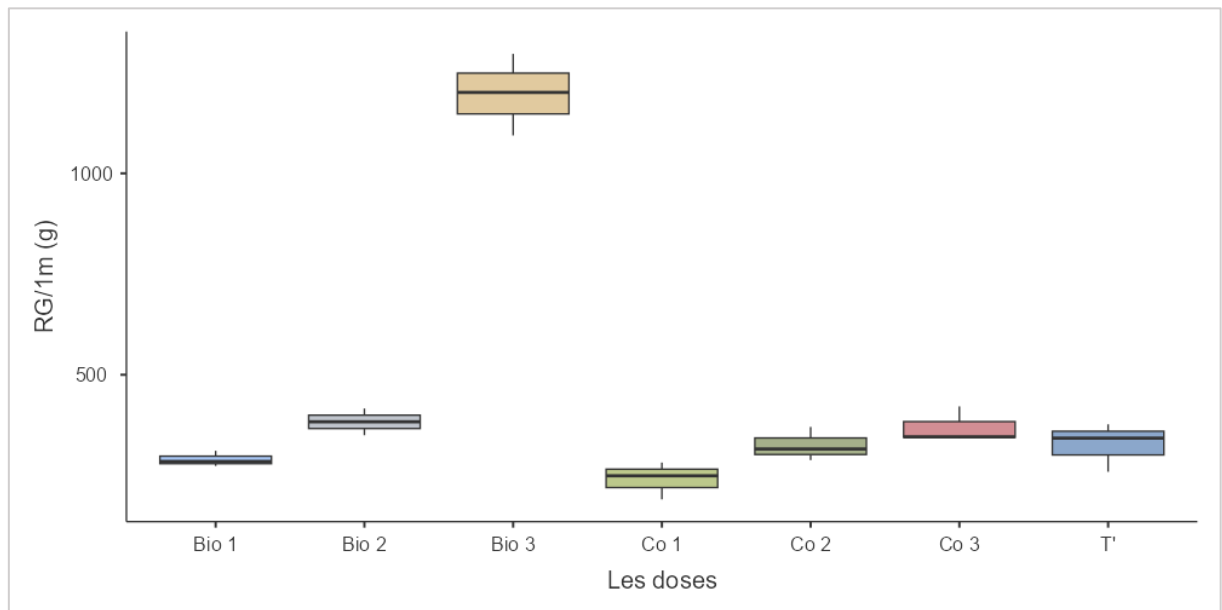


Figure 4. Variation du rendement en grain (g/m^2) en fonction des doses de biochar et de compost

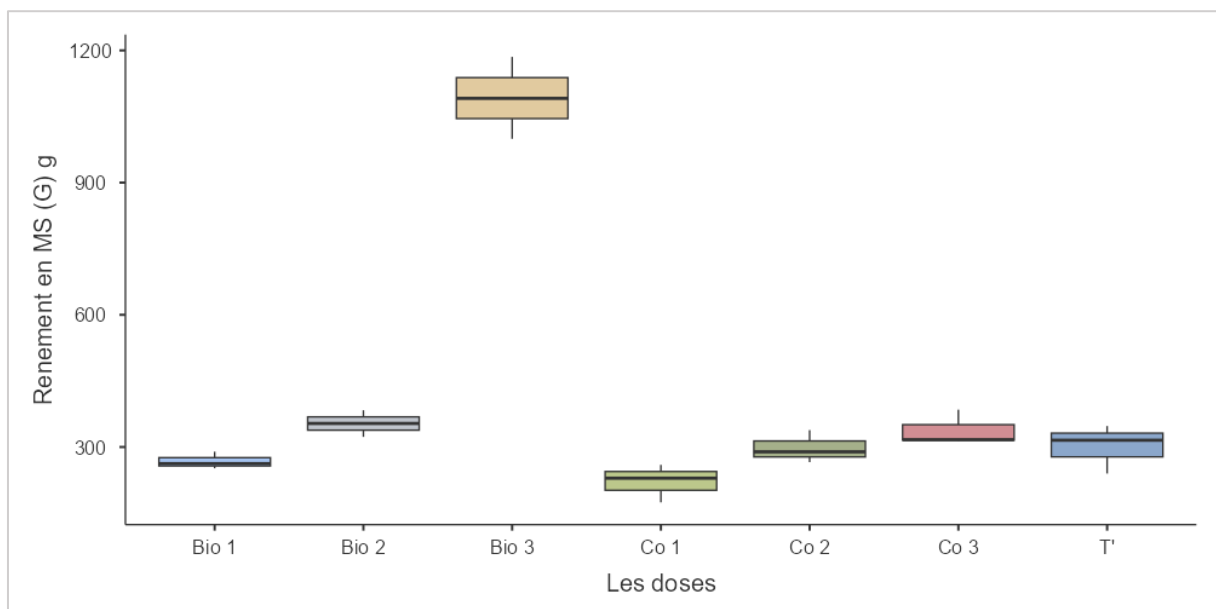


Figure. Variation du rendement en matière sèche des grains (g/m^2) en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que le rendement en grain et le rendement en matière sèche des grains ont été influencés de manière similaire par les différentes doses de biochar et de

compost appliqué. Aucune différence significative n'a été observée entre le témoin ($326 \pm 60,6$ g pour le rendement en grain et $301 \pm 55,3$ g pour la matière sèche) et les traitements Bio 1, Bio 2, Co 1, Co 2 et Co 3, avec des valeurs de p supérieures à 0,05. En revanche, la dose Bio 3 se distingue par une augmentation hautement significative du rendement en grain ($1197 \pm 101,3$ g) ainsi que du rendement en matière sèche des grains ($1092 \pm 93,0$ g), avec une valeur de p inférieure à 0,001. Ces résultats indiquent clairement que seule l'application d'une dose élevée de biochar a permis d'améliorer significativement la production de grains, tant en termes de poids frais que de matière sèche, tandis que les autres traitements n'ont pas induit d'effet notable.

L'absence d'effet significatif des doses faibles à modérées de biochar et des traitements à base de compost suggère que ces apports n'ont pas été suffisants pour améliorer les conditions de nutrition minérale et hydrique de la plante au point d'augmenter le rendement reproductif. Ce résultat est cohérent avec plusieurs études montrant que les effets du biochar sur les rendements agricoles sont souvent limités à faible dose et dépendent fortement des caractéristiques du sol et des conditions environnementales. Liu *et al.* (2013) ont ainsi montré, à travers une méta-analyse, que l'effet du biochar sur les rendements varie considérablement et reste souvent non significatif dans certaines conditions. De même, Ye *et al.* (2020) ont confirmé que les réponses des cultures au biochar sont très variables et que les augmentations de rendement sont généralement modérées lorsque le biochar est appliqué seul et à des doses faibles.

En revanche, l'augmentation très importante observée avec la dose Bio 3 indique qu'un seuil d'efficacité a été atteint, au-delà duquel le biochar améliore significativement les propriétés physico-chimiques du sol. Cette amélioration concerne notamment la capacité de rétention en eau, la disponibilité des nutriments et l'activité biologique du sol, ce qui favorise à la fois la croissance végétative et la formation des grains. Ce mécanisme a été largement décrit dans la littérature, où le biochar est reconnu pour améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau et des nutriments, en particulier dans les sols à faible fertilité (Lehmann et Joseph, 2015). De plus, Razzaghi *et al.* (2020) ont montré que le biochar augmente la capacité du sol à retenir l'eau, ce qui permet de réduire le stress hydrique et d'améliorer la productivité des cultures.

La similitude des tendances observées entre le rendement en grain et le rendement en matière sèche des grains indique que l'augmentation du rendement n'est pas liée à une variation de la teneur en eau des grains, mais correspond bien à une accumulation réelle de matière sèche. Cela

reflète une amélioration effective de la photosynthèse et de la translocation des assimilats vers les organes reproducteurs, ce qui confirme l'effet positif du biochar à forte dose sur le fonctionnement physiologique de la plante.

Ces résultats présentent un intérêt important, car une augmentation significative du rendement en grain s'accompagne généralement d'une augmentation de la biomasse totale, incluant les résidus de culture tels que la paille. Cette paille constitue une ressource essentielle pour l'alimentation des ruminants, notamment dans les systèmes extensifs. Ainsi, l'application de biochar à dose élevée permet non seulement d'améliorer la production de grains destinés à l'alimentation humaine ou animale, mais également d'accroître la disponibilité de fourrages. Toutefois, comme souligné dans plusieurs travaux, l'augmentation du rendement ne s'accompagne pas nécessairement d'une amélioration de la qualité nutritive des grains ou de la paille, ce qui nécessite des analyses complémentaires pour évaluer leur valeur alimentaire réelle (Chan et Xu, 2009 ; Van Soest, 1994).

2. Matière sèche des grains (MS %))

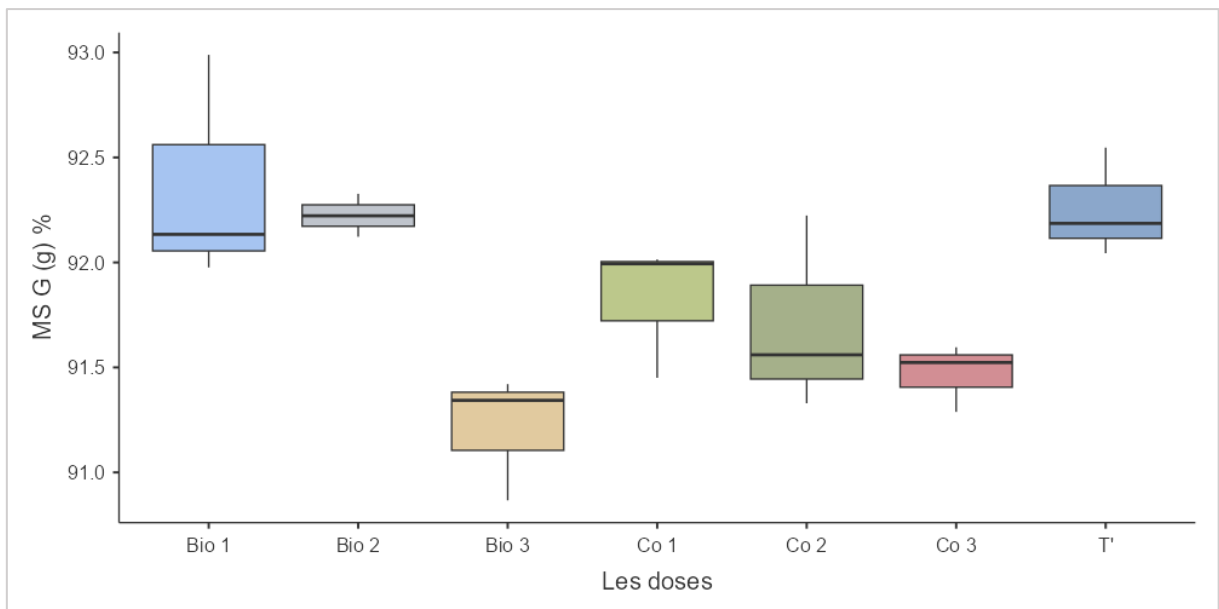


Figure 5. Variation de la teneur en matière sèche (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en matière sèche des grains varie légèrement selon les doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une valeur moyenne de $92,3 \pm 0,259$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($92,4 \pm 0,545$ %), Bio 2 ($92,2 \pm$

0,102 %), Co 1 ($91,8 \pm 0,320$ %), Co 2 ($91,7 \pm 0,464$ %) et Co 3 ($91,5 \pm 0,161$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin, avec une valeur de p supérieure à 0,05. En revanche, la dose Bio 3 a entraîné une diminution légère mais statistiquement significative de la matière sèche des grains, avec une valeur moyenne de $91,2 \pm 0,300$ %, inférieure à celle du témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que seule la dose élevée de biochar a influencé la teneur en matière sèche, tandis que les autres traitements n'ont pas modifié ce paramètre de manière notable.

L'absence d'effet significatif des doses faibles et modérées de biochar ainsi que du compost suggère que ces amendements n'ont pas altéré les processus de remplissage des grains ni leur composition globale en eau et en matière sèche. Cela est cohérent avec plusieurs études montrant que les amendements organiques influencent davantage le rendement que les paramètres qualitatifs des grains, en particulier lorsque les doses appliquées restent modérées. Par exemple, Liu *et al.* (2013) ont montré que le biochar a un effet variable sur les caractéristiques des cultures, avec un impact plus marqué sur la production que sur la composition des grains. De même, Biederman et Harpole (2013) ont indiqué que les modifications de la qualité des produits végétaux restent souvent limitées comparativement aux effets observés sur la biomasse.

La diminution significative de la matière sèche observée avec la dose Bio 3 peut être interprétée comme un effet de dilution lié à l'augmentation importante du rendement en grain. En effet, une production élevée peut entraîner une accumulation plus importante d'eau dans les grains ou une modification de la répartition des constituants, ce qui se traduit par une légère baisse du pourcentage de matière sèche. Ce phénomène a été rapporté dans plusieurs travaux, où l'augmentation du rendement est parfois associée à une légère réduction de la concentration en matière sèche ou en certains constituants, en raison d'une dilution des composés dans une biomasse plus importante (Jarrell et Beverly, 1981). Par ailleurs, l'amélioration de la disponibilité en eau du sol sous l'effet du biochar peut également contribuer à maintenir une hydratation plus élevée des tissus végétaux, ce qui influence la teneur finale en matière sèche (Razzaghi *et al.*, 2020).

Cette légère diminution de la matière sèche reste sans impact majeur, car les valeurs observées demeurent élevées et compatibles avec une bonne conservation des grains. Une teneur élevée en matière sèche est généralement associée à une meilleure stabilité lors du stockage et à une concentration énergétique adéquate pour l'alimentation animale. Ainsi, malgré la légère baisse

observée avec la dose Bio 3, la qualité globale des grains reste satisfaisante. Toutefois, ces résultats confirment l'importance d'évaluer simultanément les paramètres quantitatifs et qualitatifs afin de mieux apprécier l'intérêt des amendements dans les systèmes de production intégrant l'alimentation animale (Van Soest, 1994).

3. Humidité des grains

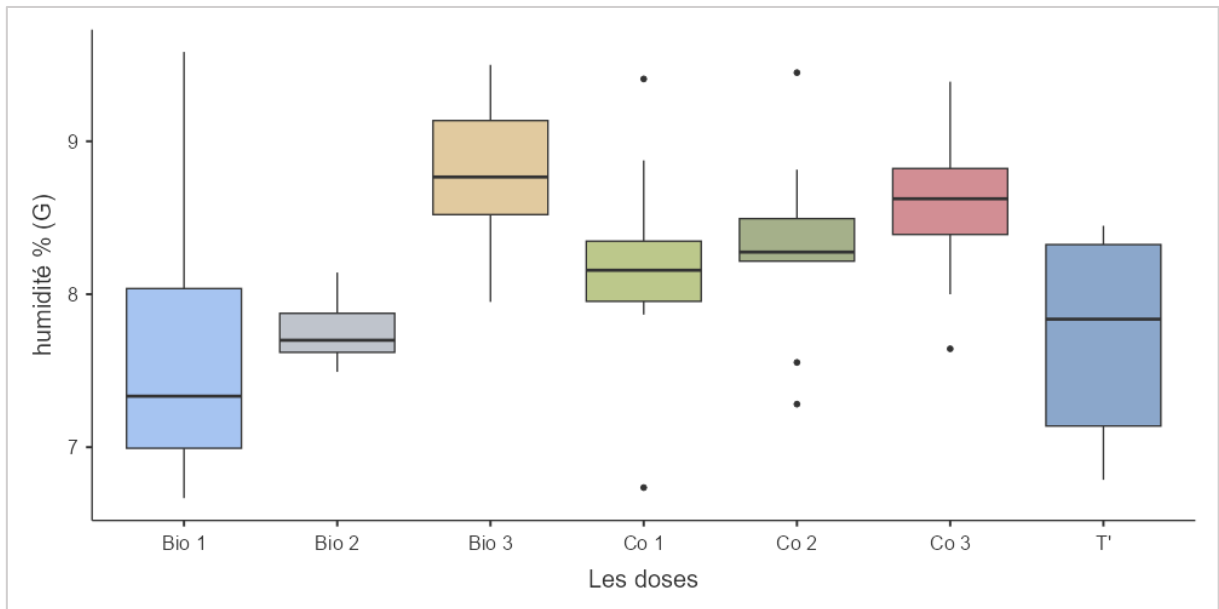


Figure 6. Variation de la teneur en humidité (%) des grains en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en humidité des grains varie légèrement en fonction des doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une humidité moyenne de $7,74 \pm 0,62$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($7,63 \pm 0,96$ %), Bio 2 ($7,78 \pm 0,24$ %), Co 1 ($8,18 \pm 0,73$ %), Co 2 ($8,30 \pm 0,64$ %) et Co 3 ($8,53 \pm 0,51$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin, avec une valeur de p supérieure à 0,05. En revanche, la dose Bio 3 a entraîné une augmentation significative de l'humidité des grains, atteignant $8,79 \pm 0,49$ %, soit une valeur significativement supérieure à celle du témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que seule la dose élevée de biochar a influencé ce paramètre, tandis que les autres traitements n'ont pas modifié de manière notable l'humidité des grains.

L'absence d'effet significatif des doses faibles et modérées de biochar ainsi que du compost suggère que ces amendements n'ont pas perturbé les processus physiologiques liés au remplissage des grains ni leur équilibre hydrique. Cela est cohérent avec plusieurs études

montrant que les amendements organiques influencent davantage la croissance et le rendement que les caractéristiques physiques des grains, en particulier lorsque les doses restent modérées. Liu et al. (2013) ont ainsi montré que les effets du biochar sur les propriétés des cultures sont variables, avec un impact souvent plus marqué sur la productivité que sur la composition ou l'humidité des grains. De même, Jeffery *et al.* (2011) ont rapporté que les changements dans les paramètres qualitatifs des récoltes restent généralement limités comparativement aux gains de rendement.

L'augmentation significative de l'humidité observée avec la dose Bio 3 peut être attribuée à l'amélioration des conditions hydriques du sol induite par le biochar. En effet, le biochar est reconnu pour sa capacité à augmenter la rétention en eau du sol, ce qui peut conduire à une meilleure hydratation des plantes et, par conséquent, à une teneur en eau plus élevée dans les grains au moment de la récolte. Ce mécanisme a été mis en évidence par Razzaghi *et al.* (2020), qui ont démontré que le biochar améliore significativement la capacité de rétention en eau du sol, réduisant ainsi le stress hydrique et favorisant le remplissage des grains. Par ailleurs, une production accrue de biomasse et de grains, comme observée avec la dose Bio 3, peut également s'accompagner d'une légère augmentation de l'humidité, liée à une croissance plus active et à un métabolisme végétal intensifié.

Cette augmentation de l'humidité des grains reste modérée et n'affecte pas de manière significative leur valeur nutritive. Les grains présentent toujours une teneur en matière sèche élevée, garantissant une bonne concentration énergétique et une digestibilité satisfaisante pour les animaux. Toutefois, une humidité légèrement plus élevée peut avoir des implications sur la conservation, car elle favorise le développement de micro-organismes, notamment les moisissures, si les conditions de stockage ne sont pas adéquates. Selon McDonald et al. (2011), le contrôle de l'humidité est un facteur essentiel pour préserver la qualité des aliments destinés aux animaux.

4. Teneur en cendres et en matière organique

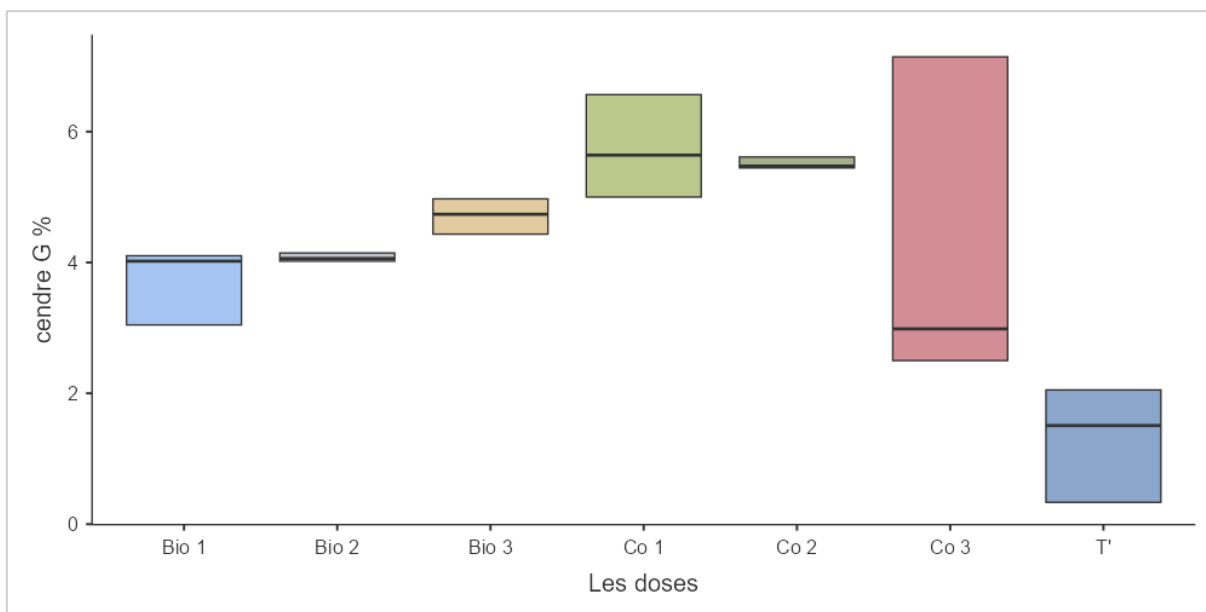


Figure 7. Variation de la teneur en cendres (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

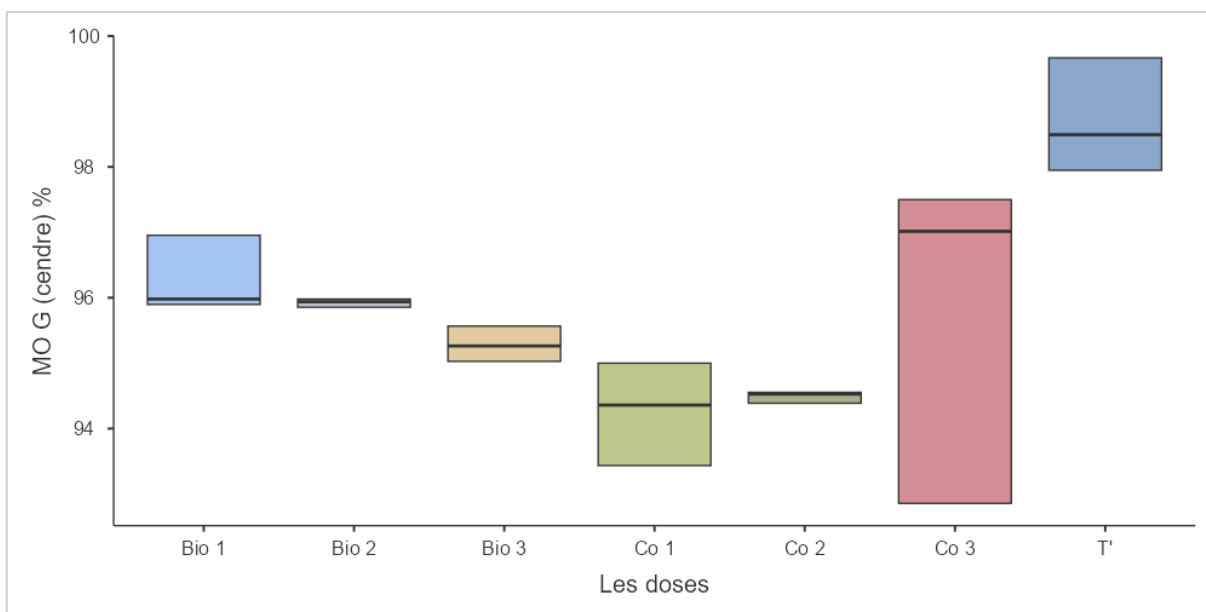


Figure 8. Variation de la matière organique (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en cendres et en matière organique des grains est significativement influencée par les différentes doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin présente la teneur en cendres la plus faible ($1,30 \pm 0,76$ %), tandis que l'ensemble des

traitements, en particulier ceux à base de compost, entraînent une augmentation significative de cette fraction minérale. Les valeurs les plus élevées sont observées pour Co 1 ($5,74 \pm 0,68 \%$) et Co 2 ($5,51 \pm 0,08 \%$), suivies par Bio 3 ($4,71 \pm 0,23 \%$) et Co 3 ($4,21 \pm 2,21 \%$), ce qui indique un enrichissement marqué en éléments minéraux. À l'inverse, la matière organique suit une tendance opposée, avec une valeur maximale chez le témoin ($98,7 \pm 0,76 \%$) et une diminution significative pour les traitements Co 1 et Co 2, tandis que les traitements au biochar et Co 3 ne présentent pas de différence significative. Ces résultats traduisent un effet direct des amendements, notamment du compost, sur la composition chimique des grains.

L'augmentation de la teneur en cendres observée dans les traitements, particulièrement ceux enrichis en compost, peut être attribuée à l'apport direct d'éléments minéraux ainsi qu'à une amélioration de leur disponibilité dans le sol. Le compost est reconnu pour sa richesse en nutriments essentiels tels que le phosphore, le potassium, le calcium et le magnésium, ce qui favorise leur absorption par les plantes et leur accumulation dans les grains. Des travaux ont montré que les amendements organiques, notamment le compost, peuvent augmenter significativement la concentration en minéraux des cultures en améliorant la fertilité chimique et biologique du sol (Bernal *et al.*, 2009). De même, Agegnehu *et al.* (2017) ont démontré que l'application de compost et de biochar améliore la disponibilité des nutriments et leur assimilation par les plantes, conduisant à une augmentation de la fraction minérale dans les produits récoltés.

La diminution de la matière organique observée dans certains traitements, en particulier Co 1 et Co 2, peut être expliquée par un effet de dilution inverse lié à l'augmentation de la fraction minérale. En effet, une accumulation plus importante de minéraux dans les grains entraîne mécaniquement une réduction relative de la proportion de matière organique. Ce phénomène est bien connu en nutrition végétale, où une augmentation des éléments minéraux peut modifier la composition globale des tissus végétaux (Jarrell et Beverly, 1981). Par ailleurs, les conditions de nutrition minérale influencent directement la synthèse et l'accumulation des composés organiques tels que les glucides et les protéines, ce qui peut également expliquer la variation observée.

Concernant les traitements au biochar, les effets sur la composition des grains restent plus modérés, ce qui suggère que le biochar agit davantage sur l'amélioration des propriétés physiques et hydriques du sol que sur un apport direct en nutriments. Toutefois, plusieurs études indiquent que le biochar peut indirectement améliorer la disponibilité des éléments minéraux

en augmentant la capacité d'échange cationique et en réduisant les pertes par lessivage (Lehmann et Joseph, 2015). Cela explique les augmentations observées, bien que moins marquées que celles induites par le compost.

L'augmentation de la teneur en cendres constitue un avantage nutritionnel important, car elle reflète un enrichissement en minéraux essentiels nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme animal, notamment pour la croissance osseuse, le métabolisme énergétique et les fonctions enzymatiques. Cependant, la diminution concomitante de la matière organique peut entraîner une légère réduction de la densité énergétique des grains, étant donné que cette fraction regroupe les principaux constituants énergétiques tels que les glucides, les lipides et les protéines. Selon McDonald *et al.* (2011), la valeur énergétique des aliments est fortement liée à leur teneur en matière organique digestible, ce qui implique qu'une réduction de cette fraction peut influencer les performances zootechniques si elle n'est pas compensée dans la ration.

5. Teneur en amidon et en amylose des grains

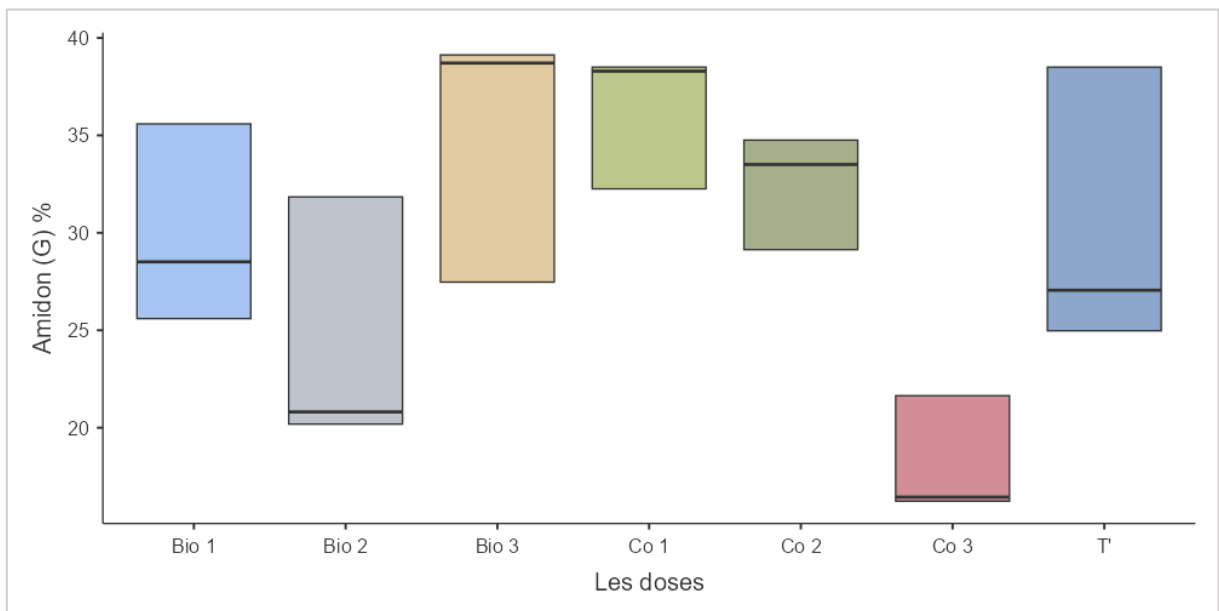


Figure 9. Variation de la teneur en amidon (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

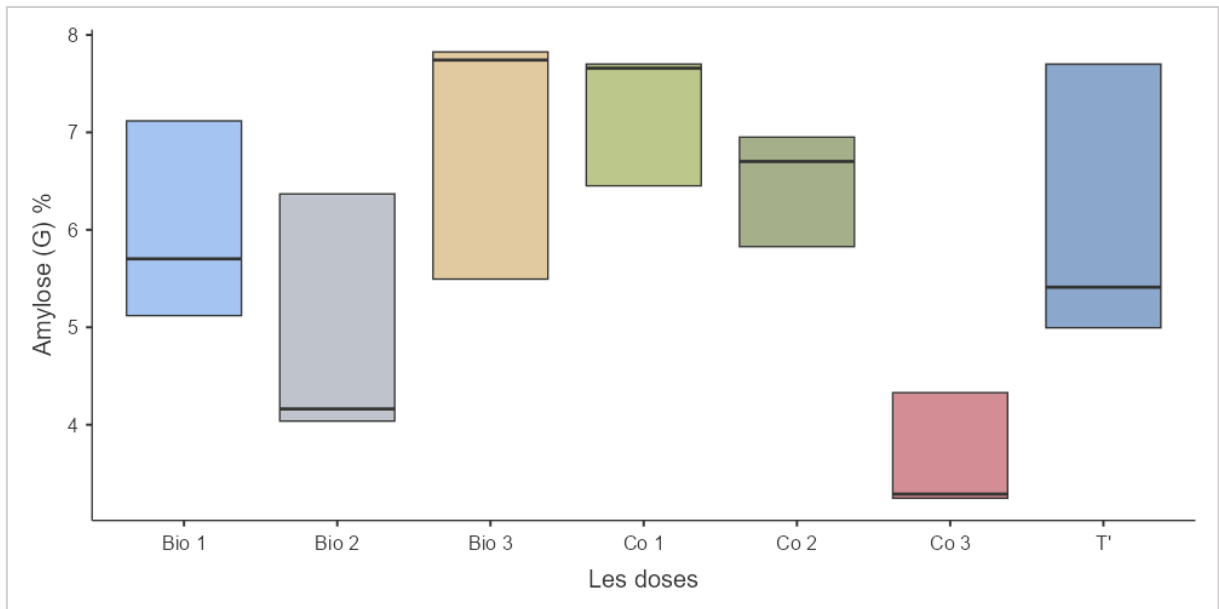


Figure 10. Variation de la teneur en amylose (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en amidon et en amylose des grains reste globalement stable sous l'effet des différentes doses de biochar et de compost appliqué, à l'exception du traitement Co 3. Aucune différence significative n'a été observée entre le témoin ($30,2 \pm 6,31$ % pour l'amidon et $6,04 \pm 1,26$ % pour l'amylose) et les traitements Bio 1, Bio 2, Bio 3, Co 1 et Co 2, avec des valeurs de p supérieures à 0,05. En revanche, la dose Co 3 a entraîné une diminution hautement significative de la teneur en amidon ($18,1 \pm 2,66$ %) ainsi que de l'amylose ($3,62 \pm 0,53$ %), avec une valeur de p inférieure à 0,001. Ces résultats indiquent que seule une dose élevée de compost a affecté négativement la synthèse et l'accumulation des glucides dans les grains, tandis que les autres traitements n'ont pas modifié ce paramètre de manière significative.

La stabilité observée pour la majorité des traitements suggère que les apports modérés de biochar et de compost n'ont pas perturbé les mécanismes physiologiques responsables de la synthèse de l'amidon, notamment la photosynthèse et la translocation des assimilats vers les grains. Cela est en accord avec plusieurs études montrant que les amendements organiques influencent principalement le rendement et les propriétés du sol, sans altérer de manière significative la composition glucidique des grains lorsque les conditions nutritionnelles restent équilibrées. Par exemple, Liu *et al.* (2013) ont montré que les effets du biochar sur la qualité des cultures sont généralement limités et que les variations observées concernent davantage la productivité que la composition biochimique.

La diminution significative de l'amidon et de l'amylose observée avec la dose Co 3 peut être expliquée par un déséquilibre nutritionnel induit par un excès de matière organique, notamment en azote. En effet, un apport élevé d'azote peut favoriser la synthèse des protéines au détriment des glucides, ce qui réduit l'accumulation d'amidon dans les grains. Ce phénomène a été décrit dans plusieurs travaux, où une fertilisation azotée excessive entraîne une diminution de la teneur en amidon en raison d'une compétition métabolique entre la synthèse des protéines et celle des glucides (Triboi *et al.*, 2003). Par ailleurs, une modification de la répartition des assimilats entre les organes végétatifs et reproducteurs peut également contribuer à cette diminution, en limitant la quantité de carbone disponible pour la formation de l'amidon.

Ces résultats présentent une importance particulière, car l'amidon constitue la principale source d'énergie dans les rations alimentaires, notamment pour les ruminants et les monogastriques. Une diminution significative de l'amidon, comme observée dans le traitement Co 3, peut entraîner une réduction de la valeur énergétique des grains, ce qui peut affecter les performances de croissance, la production laitière ou l'efficacité alimentaire. Par ailleurs, l'amylose joue un rôle déterminant dans la digestibilité de l'amidon, une teneur plus faible étant généralement associée à une digestion plus rapide, mais pouvant aussi entraîner des déséquilibres digestifs selon les espèces et les régimes alimentaires. Selon Svihus *et al.* (2005), la structure de l'amidon, notamment le rapport amylose/amylopectine, influence fortement la vitesse et l'efficacité de la digestion chez les animaux.

En revanche, la stabilité de la teneur en amidon et en amylose observée dans les traitements à base de biochar et de compost à doses modérées constitue un avantage important, car elle garantit le maintien de la qualité énergétique des grains. Cela permet leur utilisation en alimentation animale sans nécessiter d'ajustements majeurs dans la formulation des rations, tout en bénéficiant des effets positifs des amendements sur la production globale. Ces résultats confirment ainsi l'intérêt d'une gestion raisonnée des apports organiques afin d'optimiser à la fois le rendement et la qualité nutritionnelle des cultures dans les systèmes de production intégrés.

6. Teneur en amylopectine des grains

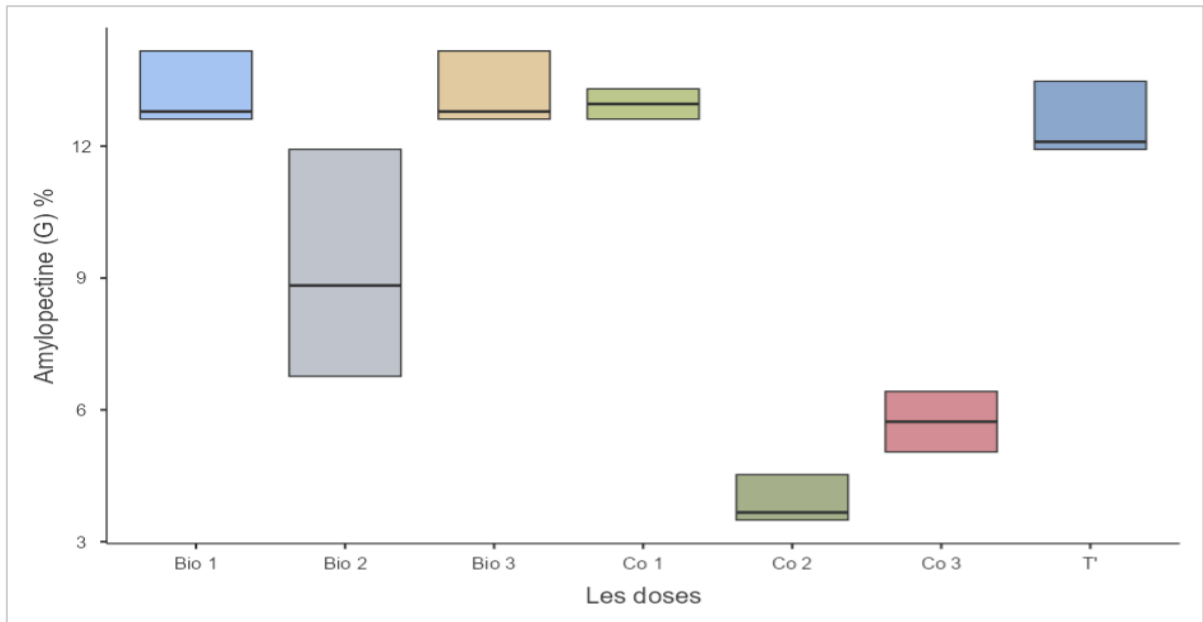


Figure 11. Variation de la teneur en amylopectine (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en amylopectine des grains est influencée de manière variable par les différentes doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une valeur moyenne de $12,50 \pm 0,74$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($13,19 \pm 0,74$ %), Bio 3 ($13,19 \pm 0,74$ %) et Co 1 ($12,96 \pm 0,30$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin ($p > 0,05$). En revanche, une diminution significative de la teneur en amylopectine a été observée pour les traitements Bio 2 ($9,17 \pm 2,25$ %), Co 2 ($3,90 \pm 0,48$ %) et Co 3 ($5,73 \pm 0,60$ %), avec des valeurs significativement inférieures à celle du témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que certaines doses intermédiaires ou élevées de biochar et de compost peuvent affecter négativement la fraction amylopectine de l'amidon, tandis que d'autres traitements n'ont pas modifié ce paramètre.

L'absence d'effet significatif observée pour les traitements Bio 1, Bio 3 et Co 1 suggère que, dans ces conditions, les amendements n'ont pas perturbé les mécanismes enzymatiques impliqués dans la biosynthèse de l'amidon, notamment l'activité des enzymes de ramification responsables de la formation de l'amylopectine. Cela traduit un équilibre nutritionnel permettant le maintien d'un métabolisme glucidique normal. Ce constat est en accord avec plusieurs travaux indiquant que les amendements organiques n'affectent pas systématiquement la structure de l'amidon lorsque les conditions de nutrition restent équilibrées (Liu *et al.*, 2013).

En revanche, la diminution significative de l'amylopectine observée dans les traitements Bio 2, Co 2 et Co 3 suggère une perturbation du métabolisme glucidique. Cette perturbation pourrait être liée à un déséquilibre dans la disponibilité des nutriments, notamment un excès d'azote dans le cas du compost, qui favorise la synthèse des protéines au détriment des glucides. Ce phénomène a été largement décrit dans la littérature, où une fertilisation azotée élevée peut modifier la composition de l'amidon et réduire certaines de ses fractions (Triboi *et al.*, 2003). Par ailleurs, des modifications de l'activité enzymatique impliquée dans la formation des chaînes ramifiées de l'amidon peuvent également expliquer la réduction de l'amylopectine.

Ces résultats sont particulièrement importants, car l'amylopectine constitue la fraction la plus digestible de l'amidon en raison de sa structure ramifiée, qui facilite l'action des enzymes digestives. Une diminution de cette fraction, comme observée dans les traitements Bio 2, Co 2 et Co 3, peut entraîner une réduction de la digestibilité de l'amidon et donc de la disponibilité énergétique des grains. Selon Svihus *et al.* (2005), la structure de l'amidon, en particulier le rapport entre amylose et amylopectine, influence directement la vitesse et l'efficacité de la digestion chez les animaux. Ainsi, une baisse de l'amylopectine peut avoir des répercussions sur les performances zootechniques, notamment la croissance, l'efficacité alimentaire et la production laitière.

À l'inverse, les traitements n'ayant pas modifié significativement la teneur en amylopectine, notamment Bio 1, Bio 3 et Co 1, permettent de maintenir une bonne qualité énergétique et une digestibilité optimale des grains. Ces traitements apparaissent donc plus favorables dans une perspective de valorisation en alimentation animale, car ils assurent un équilibre entre production et qualité nutritionnelle. Ces résultats confirment l'importance d'une gestion raisonnée des amendements organiques afin d'éviter les déséquilibres nutritionnels pouvant affecter la qualité des produits agricoles.

7. Sucres totaux des grains

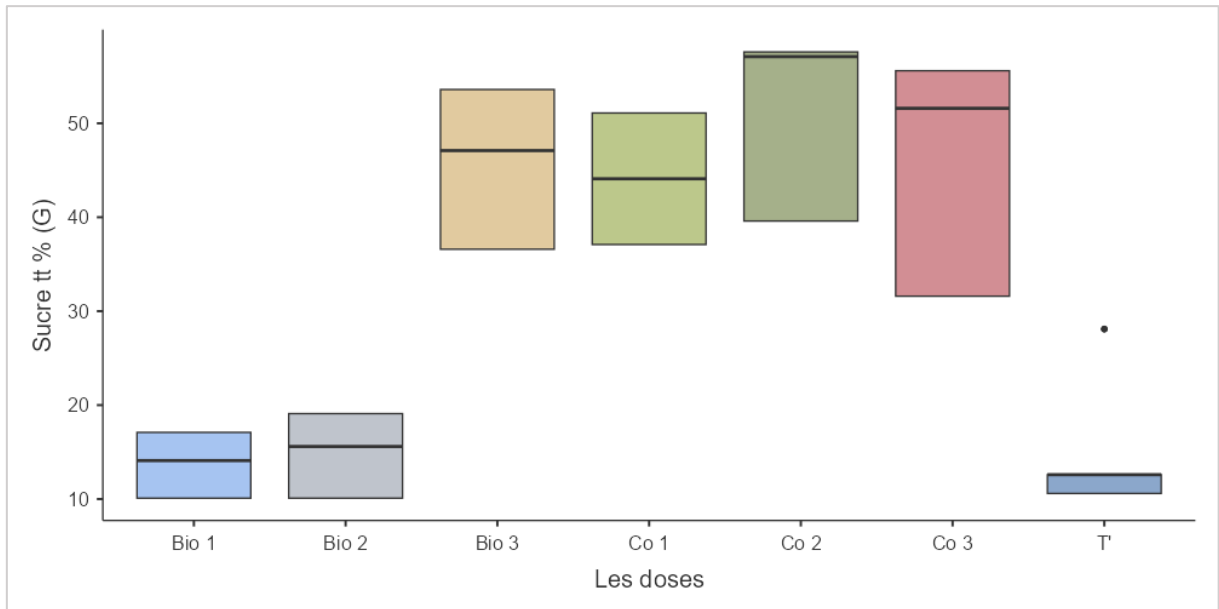


Figure 12. Variation de la teneur en sucres totaux (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en sucres totaux des grains est fortement influencée par les doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une teneur moyenne de $15,3 \pm 7,33$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($13,8 \pm 3,04$ %) et Bio 2 ($14,9 \pm 3,93$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin, avec une valeur de p supérieure à 0,05. En revanche, une augmentation hautement significative de la teneur en sucres totaux a été observée pour les traitements Bio 3 ($45,8 \pm 7,43$ %), Co 1 ($44,1 \pm 6,06$ %), Co 2 ($51,4 \pm 8,88$ %) et Co 3 ($46,3 \pm 11,14$ %), avec des valeurs significativement supérieures à celle du témoin ($p < 0,001$). Ces résultats indiquent que les doses élevées de biochar ainsi que les différentes doses de compost favorisent une accumulation importante de sucres solubles dans les grains.

L'absence d'effet significatif observée pour les traitements Bio 1 et Bio 2 suggère que les doses faibles à modérées de biochar n'ont pas modifié de manière notable le métabolisme des glucides solubles. Cela indique que l'équilibre entre la photosynthèse, le transport des assimilats et leur conversion en composés de réserve, notamment l'amidon, reste globalement stable dans ces conditions. Ce résultat est en accord avec les observations de Liu *et al.* (2013), qui montrent que les effets du biochar sur la composition biochimique des cultures sont généralement limités lorsque les doses appliquées sont faibles.

En revanche, l'augmentation très importante des sucres totaux observée dans les traitements Bio 3 et surtout dans les traitements à base de compost traduit une modification du métabolisme du carbone dans la plante. Cette accumulation de sucres peut être liée à une amélioration de la disponibilité des nutriments et des conditions de croissance, favorisant une activité photosynthétique accrue et une production plus importante d'assimilats. Par ailleurs, dans le cas du compost, la richesse en azote et l'augmentation de l'activité microbienne du sol peuvent orienter le métabolisme vers une accumulation de sucres solubles au détriment de leur polymérisation en amidon. Ce phénomène a été décrit dans plusieurs études montrant que la nutrition azotée et les conditions de croissance influencent la répartition du carbone entre sucres solubles et amidon (Taiz *et al.*, 2015).

L'augmentation de la teneur en sucres totaux présente des implications importantes. Les sucres solubles constituent une source d'énergie rapidement disponible, particulièrement pour les ruminants, où ils sont rapidement fermentés dans le rumen pour produire des acides gras volatils, principaux précurseurs énergétiques. Ainsi, une augmentation des sucres peut améliorer la digestibilité rapide de la ration et soutenir certaines performances, notamment la production laitière. Selon McDonald *et al.* (2011), les glucides solubles jouent un rôle clé dans l'équilibre énergétique des rations et dans l'efficacité de la fermentation ruminale.

Cependant, une teneur excessive en sucres solubles peut également présenter des risques. Un excès de glucides rapidement fermentescibles peut entraîner des déséquilibres digestifs, notamment une acidose ruminale, en particulier si la ration est pauvre en fibres structurales. De plus, l'augmentation des sucres au détriment de l'amidon, comme suggéré dans certains traitements, peut modifier le profil énergétique global des grains et influencer leur utilisation métabolique par les animaux. Nocek (1997) souligne que l'équilibre entre glucides rapidement et lentement fermentescibles est essentiel pour maintenir une bonne santé digestive et optimiser les performances animales.

Ainsi, les grains issus des traitements Bio 3 et des traitements à base de compost, en particulier Co 2, présentent un potentiel énergétique intéressant mais nécessitent une gestion rationnelle dans les systèmes d'alimentation animale afin d'éviter les déséquilibres. À l'inverse, les traitements Bio 1 et Bio 2 permettent de maintenir une composition plus stable, ce qui peut être favorable pour une utilisation sans ajustement majeur des rations. Ces résultats confirment l'importance d'intégrer les paramètres de qualité nutritionnelle dans l'évaluation des pratiques de fertilisation, en particulier dans les systèmes de production combinant agriculture et élevage.

8. Sucres réducteurs des grains

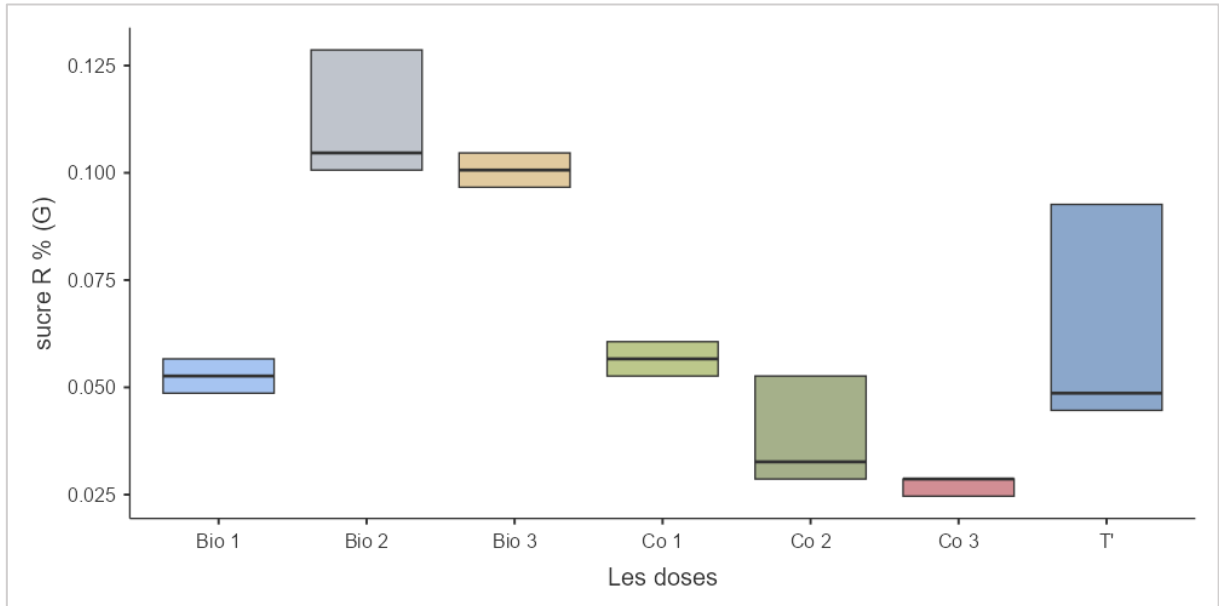


Figure 13. Variation de la teneur en sucres réducteurs (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en sucres réducteurs des grains est influencée de manière différenciée par les doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une valeur moyenne de $0,0620 \pm 0,0231$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($0,0526 \pm 0,0035$ %), Co 1 ($0,0566 \pm 0,0035$ %) et Co 2 ($0,0380 \pm 0,0111$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin ($p > 0,05$). En revanche, une augmentation significative de la teneur en sucres réducteurs a été observée pour les traitements Bio 2 ($0,1113 \pm 0,0131$ %) et Bio 3 ($0,1006 \pm 0,0035$ %), avec des valeurs significativement supérieures à celle du témoin ($p < 0,05$). À l'inverse, le traitement Co 3 a entraîné une diminution significative de cette teneur, avec une valeur de $0,0273 \pm 0,0020$ %, inférieure à celle du témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que certaines doses de biochar favorisent l'accumulation des sucres simples, tandis qu'une dose élevée de compost peut avoir un effet inverse.

L'absence d'effet significatif pour les traitements Bio 1, Co 1 et Co 2 suggère que les doses faibles à modérées d'amendements n'ont pas perturbé les processus métaboliques liés à la formation et à l'utilisation des sucres simples dans les grains. Cela traduit un équilibre entre la dégradation de l'amidon et la consommation des sucres réducteurs au cours du remplissage des grains. Ce constat est cohérent avec les observations générales selon lesquelles les amendements organiques influencent davantage la productivité que la composition fine des

glucides lorsque les conditions de nutrition restent équilibrées (Liu *et al.*, 2013).

L'augmentation significative des sucres réducteurs observée dans les traitements Bio 2 et Bio 3 peut être expliquée par une intensification du métabolisme carboné, notamment une augmentation de l'hydrolyse de l'amidon en sucres simples tels que le glucose et le fructose. Le biochar, en améliorant la structure du sol, la disponibilité en eau et l'activité microbienne, peut favoriser la photosynthèse et la production d'assimilats, ce qui se traduit par une accumulation accrue de sucres solubles dans les grains. Des travaux ont montré que les conditions favorables à la croissance végétale peuvent modifier la répartition des glucides entre formes de réserve et formes solubles (Taiz *et al.*, 2015).

À l'inverse, la diminution significative observée pour le traitement Co 3 suggère qu'un apport élevé de compost peut orienter le métabolisme vers l'utilisation accrue des sucres simples pour la synthèse de composés plus complexes, tels que l'amidon ou les protéines, ou entraîner un effet de dilution lié à une modification globale de la composition du grain. Ce type de réponse a été rapporté dans des situations où la disponibilité élevée en nutriments, notamment en azote, modifie la répartition du carbone au sein de la plante (Triboi *et al.*, 2003).

Les sucres réducteurs constituent une source d'énergie rapidement disponible et jouent un rôle important dans la fermentation ruminale. Leur augmentation, comme observée dans les traitements Bio 2 et Bio 3, peut améliorer la digestibilité rapide des grains et favoriser la production d'acides gras volatils, contribuant ainsi à une meilleure valorisation énergétique de la ration. Cependant, un excès de sucres simples peut entraîner une fermentation trop rapide dans le rumen, augmentant le risque d'acidose si la ration n'est pas équilibrée en fibres structurales. Selon Nocek (1997), l'équilibre entre glucides rapidement fermentescibles et fibres est essentiel pour maintenir la santé digestive des ruminants.

À l'inverse, la diminution des sucres réducteurs observée dans le traitement Co 3 peut réduire la disponibilité immédiate de l'énergie, ce qui pourrait affecter les performances des animaux à besoins énergétiques élevés. Toutefois, cette réduction peut également contribuer à une fermentation plus stable dans le rumen, en limitant les risques de déséquilibres digestifs. Ces résultats mettent en évidence l'importance d'un équilibre entre les différentes fractions glucidiques pour optimiser la valeur nutritionnelle des grains dans les systèmes de production animale.

9. Protéine des grains

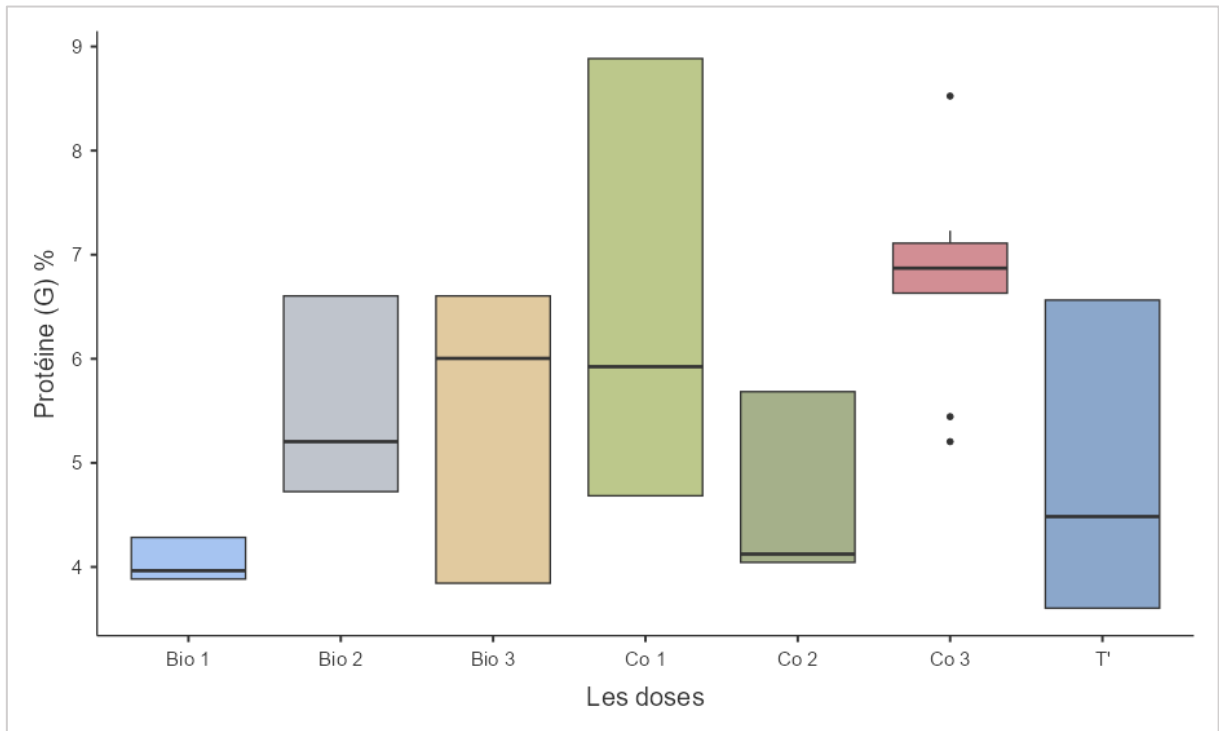


Figure 14. Variation de la protéines (%) des grains de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en protéines des grains de blé est influencée de manière variable selon les différentes doses de biochar et de compost appliquées. Le témoin (T') présente une valeur moyenne de $4,88 \pm 1,316$ %, servant de référence. Les traitements Bio 1 ($4,04 \pm 0,183$ %) et Co 2 ($4,62 \pm 0,801$ %) affichent des teneurs légèrement inférieures à celle du témoin, sans différence significative ($p > 0,05$). À l'inverse, les traitements Bio 2 ($5,51 \pm 0,846$ %) et Bio 3 ($5,48 \pm 1,257$ %) montrent une augmentation relative des protéines, bien que cette hausse reste statistiquement non significative ($p > 0,05$). En revanche, les traitements Co 1 ($6,50 \pm 1,869$ %) et Co 3 ($6,75 \pm 0,980$ %) présentent des teneurs significativement plus élevées, notamment comparées à Bio 1 et Co 2 ($p < 0,05$), indiquant un effet plus marqué du compost sur l'accumulation des protéines dans les grains de blé.

Ces résultats concordent avec plusieurs études menées sur le blé, montrant que les amendements organiques améliorent la disponibilité de l'azote et favorisent la synthèse des protéines dans les grains. Selon Marschner (2012), l'azote est l'élément clé impliqué dans la formation des protéines végétales, et sa disponibilité dans le sol conditionne directement la teneur protéique des grains. De plus, Agegnehu *et al.* (2017) ont montré que l'application de

compost augmente significativement l'absorption de l'azote et améliore la fertilité du sol, ce qui se traduit par une augmentation de la teneur en protéines du blé. À l'inverse, le biochar agit principalement de manière indirecte, en améliorant les propriétés physiques et biologiques du sol, ce qui peut expliquer ses effets moins marqués observés dans cette étude.

L'augmentation de la teneur en protéines des grains de blé constitue un paramètre important, car ces protéines représentent une source d'azote essentielle pour les ruminants. Une teneur plus élevée en protéines favorise la synthèse des protéines microbiennes dans le rumen, améliorant ainsi l'efficacité d'utilisation des aliments et les performances zootechniques (McDonald *et al.*, 2011). Toutefois, malgré les augmentations observées avec certains traitements (notamment Co 1 et Co 3), les valeurs restent globalement modérées, ce qui limite leur contribution directe à la couverture des besoins protéiques des animaux. Selon Van Soest (1994), la valeur nutritionnelle des aliments pour ruminants repose sur un équilibre entre énergie et azote.

Section 2 : Paramètres biochimiques et de qualité des pailles

1. Rendement en paille

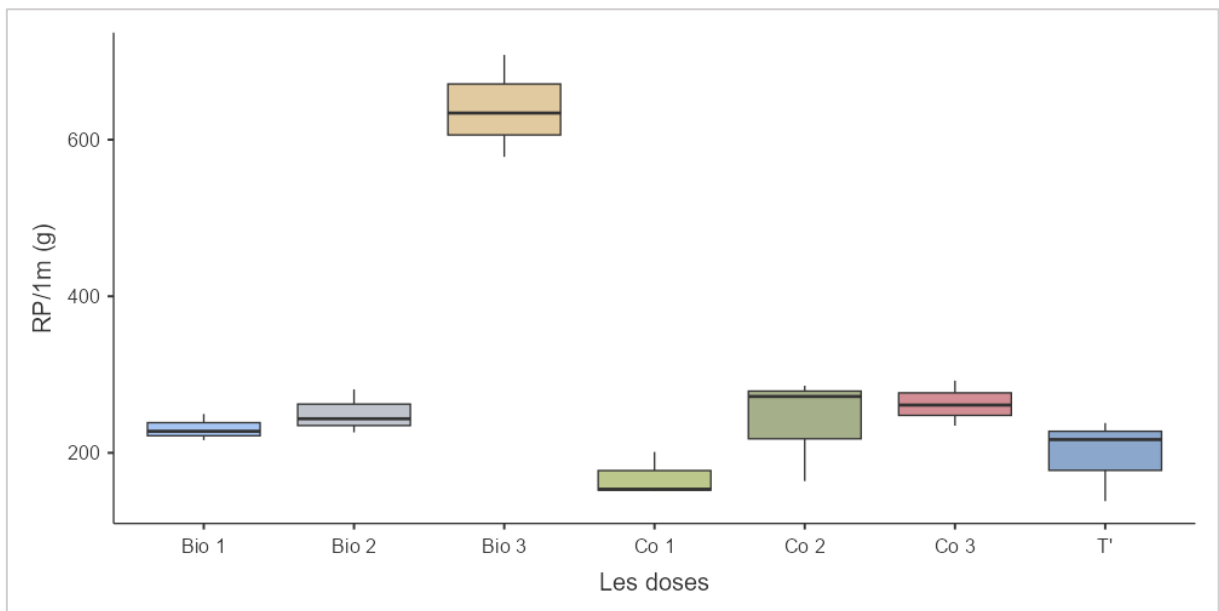


Figure 15. Variation du rendement en paille (g/m²) en fonction des doses de biochar et de compost

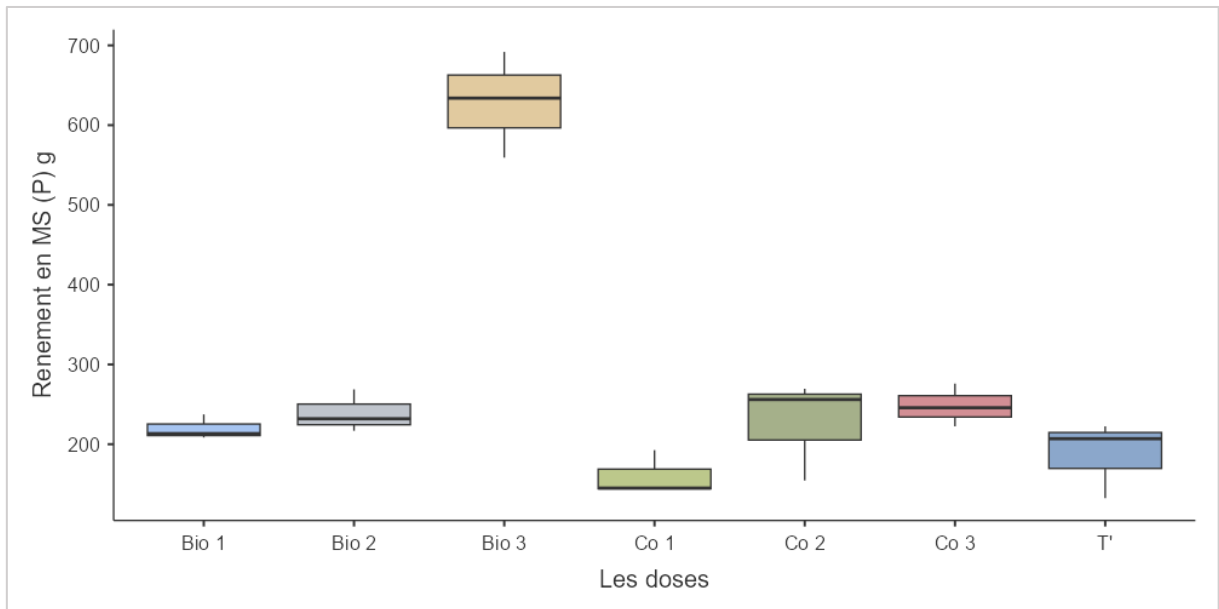


Figure 16. Variation du rendement en matière sèche des paille (g/m²) en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que le rendement en paille et le rendement en matière sèche des pailles sont influencés de manière similaire par les différentes doses de biochar et de compost appliqué. Aucune différence significative n'a été observée entre le témoin et les traitements Bio 1, Bio 2, Co 1, Co 2 et Co 3, tant pour le rendement en paille que pour la matière sèche, avec des valeurs de p supérieures à 0,05. En revanche, la dose Bio 3 se distingue par une augmentation hautement significative, avec un rendement en paille atteignant $1197 \pm 101,3$ g et une matière sèche de $628 \pm 66,4$ g, contre respectivement $326 \pm 60,6$ g et $187 \pm 48,1$ g pour le témoin ($p < 0,001$). Ces résultats indiquent clairement que seule l'application d'une dose élevée de biochar a permis d'améliorer significativement la production de biomasse végétative, tandis que les autres traitements n'ont pas induit d'effet notable.

L'absence d'effet significatif des doses faibles à modérées de biochar et du compost suggère que ces amendements n'ont pas modifié de manière suffisante les propriétés du sol pour stimuler la croissance végétative. Cela est cohérent avec plusieurs travaux indiquant que l'effet du biochar dépend fortement de la dose appliquée et des conditions du sol. Liu *et al.* (2013) ont montré que les augmentations de biomasse sont souvent limitées lorsque les doses de biochar sont faibles, tandis que des effets plus marqués apparaissent à des doses élevées. De même, Jeffery *et al.* (2011) ont rapporté que l'effet du biochar sur la productivité végétale est variable mais peut devenir significatif lorsque les conditions pédologiques et les doses sont favorables.

L'augmentation très importante observée avec la dose Bio 3 peut être attribuée à l'amélioration des propriétés physico-chimiques du sol, notamment la capacité de rétention en eau, l'aération et la disponibilité des nutriments. Ces facteurs favorisent le développement du système racinaire et la croissance des parties aériennes, conduisant à une accumulation accrue de biomasse. Par ailleurs, la concordance entre le rendement en paille et celui en matière sèche indique que cette augmentation correspond à une production réelle de matière organique et non à une simple variation de la teneur en eau. Ce résultat est en accord avec les travaux de Lehmann et Joseph (2015), qui soulignent que le biochar peut améliorer durablement la fertilité du sol et la productivité des cultures.

L'augmentation du rendement en paille constitue un avantage majeur, car la paille de blé est une ressource essentielle dans l'alimentation des ruminants, notamment comme source de fibres structurales. La paille de blé contient généralement entre 70 et 80 % de fibres (NDF), dont environ 40 à 50 % de cellulose et 15 à 20 % de lignine, ce qui la rend indispensable pour stimuler la mastication et maintenir l'activité du rumen (Van Soest, 1994). Une augmentation significative de la production de paille, comme observée avec la dose Bio 3, permet donc d'améliorer la disponibilité des ressources fourragères, en particulier dans les systèmes d'élevage extensifs ou en période de déficit alimentaire.

Cependant, la paille de blé est caractérisée par une faible valeur nutritive, avec une digestibilité généralement comprise entre 40 et 50 % de la matière sèche et une teneur en protéines brute inférieure à 4-5 % (McDonald *et al.*, 2011). Ainsi, bien que l'augmentation de la quantité de paille soit bénéfique, elle ne garantit pas une amélioration de sa qualité alimentaire. Une production plus élevée peut même s'accompagner d'une augmentation de la lignification, réduisant la digestibilité et la valeur énergétique. Selon Jung et Allen (1995), la lignine est le principal facteur limitant la digestibilité des fourrages, ce qui souligne l'importance d'évaluer la composition fibreuse des pailles produites.

Ainsi, les résultats obtenus montrent que la dose élevée de biochar permet d'augmenter significativement la production de paille, ce qui constitue un avantage important pour la production animale en termes de quantité de fourrage disponible. Toutefois, pour une valorisation optimale, il est nécessaire de compléter ces observations par des analyses de la qualité nutritionnelle des pailles, notamment la teneur en fibres (NDF, ADF), en lignine et la digestibilité, afin de mieux apprécier leur valeur réelle dans les rations alimentaires.

2. Matière sèche des pailles (MS %)

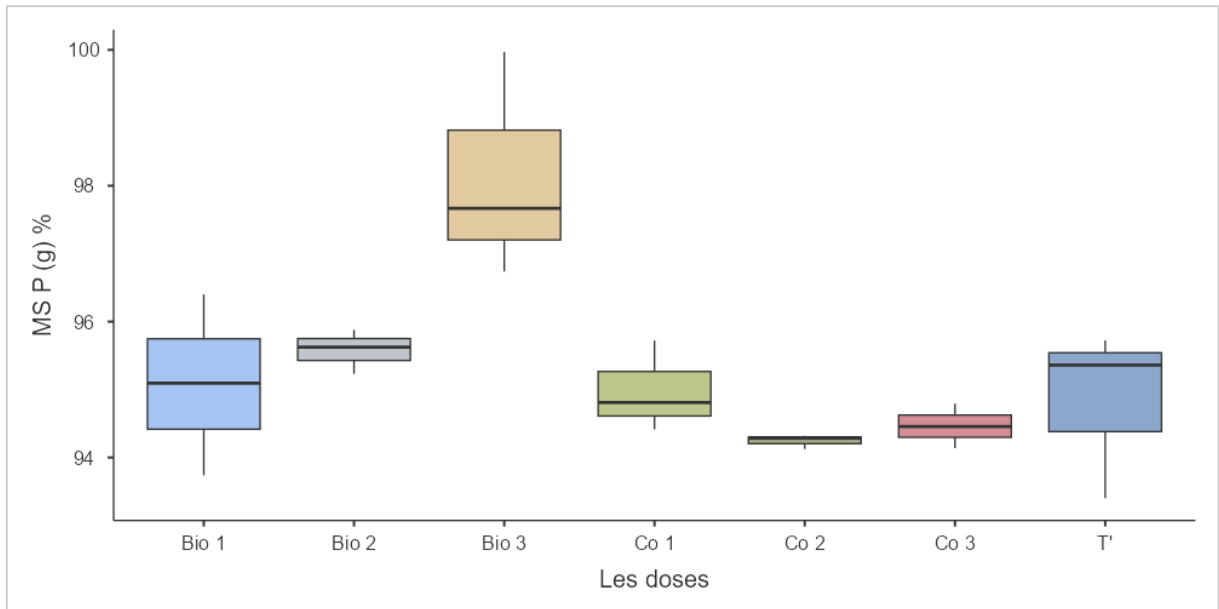


Figure 17. Variation de la teneur en matière sèche (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en matière sèche des pailles varie faiblement en fonction des doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté une valeur moyenne de $94,8 \pm 1,249$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($95,1 \pm 1,331$ %), Bio 2 ($95,6 \pm 0,325$ %), Co 1 ($95,0 \pm 0,671$ %), Co 2 ($94,2 \pm 0,104$ %) et Co 3 ($94,5 \pm 0,327$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin, avec une valeur de p supérieure à 0,05. En revanche, la dose Bio 3 a entraîné une augmentation significative de la matière sèche des pailles, atteignant $98,1 \pm 1,664$ %, soit une valeur significativement supérieure à celle du témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que seule l'application d'une dose élevée de biochar a influencé ce paramètre, tandis que les autres traitements n'ont pas modifié de manière notable la teneur en matière sèche.

La stabilité observée pour la majorité des traitements suggère que les conditions de croissance, de maturation et de dessiccation des plantes n'ont pas été significativement affectées par les doses faibles à modérées de biochar et de compost. Cela est en accord avec plusieurs études indiquant que les amendements organiques influencent davantage la production de biomasse que les caractéristiques physiques des résidus végétaux, notamment leur teneur en eau. Liu et al. (2013) ont montré que les effets du biochar sur les cultures concernent principalement le rendement, tandis que les paramètres qualitatifs restent relativement stables

en l'absence de changements majeurs dans les conditions de croissance.

L'augmentation significative de la matière sèche observée avec la dose Bio 3 peut être attribuée à une amélioration des conditions physiologiques de la plante, favorisant une accumulation plus importante de matière organique et une réduction relative de la teneur en eau. Le biochar est reconnu pour améliorer la structure du sol, l'aération et la gestion de l'eau, ce qui peut accélérer la maturation des plantes et conduire à des tissus végétaux plus secs à la récolte. Razzaghi *et al.* (2020) ont montré que le biochar améliore la dynamique de l'eau dans le sol, ce qui peut influencer le statut hydrique des plantes et, par conséquent, la teneur en eau des tissus végétaux.

Une teneur élevée en matière sèche des pailles constitue un avantage important pour la conservation, car elle limite le développement des micro-organismes et réduit les pertes lors du stockage. En pratique, les pailles ayant une teneur en matière sèche supérieure à 85–90 % sont considérées comme stables et adaptées à un stockage prolongé (McDonald *et al.*, 2011). Ainsi, les valeurs observées dans cette étude, notamment pour le traitement Bio 3, indiquent une excellente aptitude à la conservation, ce qui représente un atout pour les systèmes d'élevage.

Cependant, une teneur élevée en matière sèche est souvent associée à une augmentation de la lignification des tissus végétaux, ce qui peut réduire la digestibilité de la paille. En effet, la lignine limite l'accès des micro-organismes du rumen aux parois cellulaires, ce qui diminue la dégradation des fibres. La digestibilité de la paille de blé est généralement comprise entre 40 et 50 % de la matière sèche, mais peut diminuer lorsque la lignification augmente (Jung & Allen, 1995). Par conséquent, bien que l'augmentation de la matière sèche améliore la conservation, elle peut s'accompagner d'une diminution de la valeur nutritive, ce qui nécessite une complémentation alimentaire adaptée pour optimiser les performances animales.

Ainsi, les résultats obtenus montrent que l'application de biochar à dose élevée améliore la teneur en matière sèche des pailles, ce qui constitue un avantage pour la gestion et le stockage des fourrages, mais nécessite une attention particulière quant à la digestibilité et à la valorisation nutritionnelle dans les rations animales.

3. Humidité des pailles

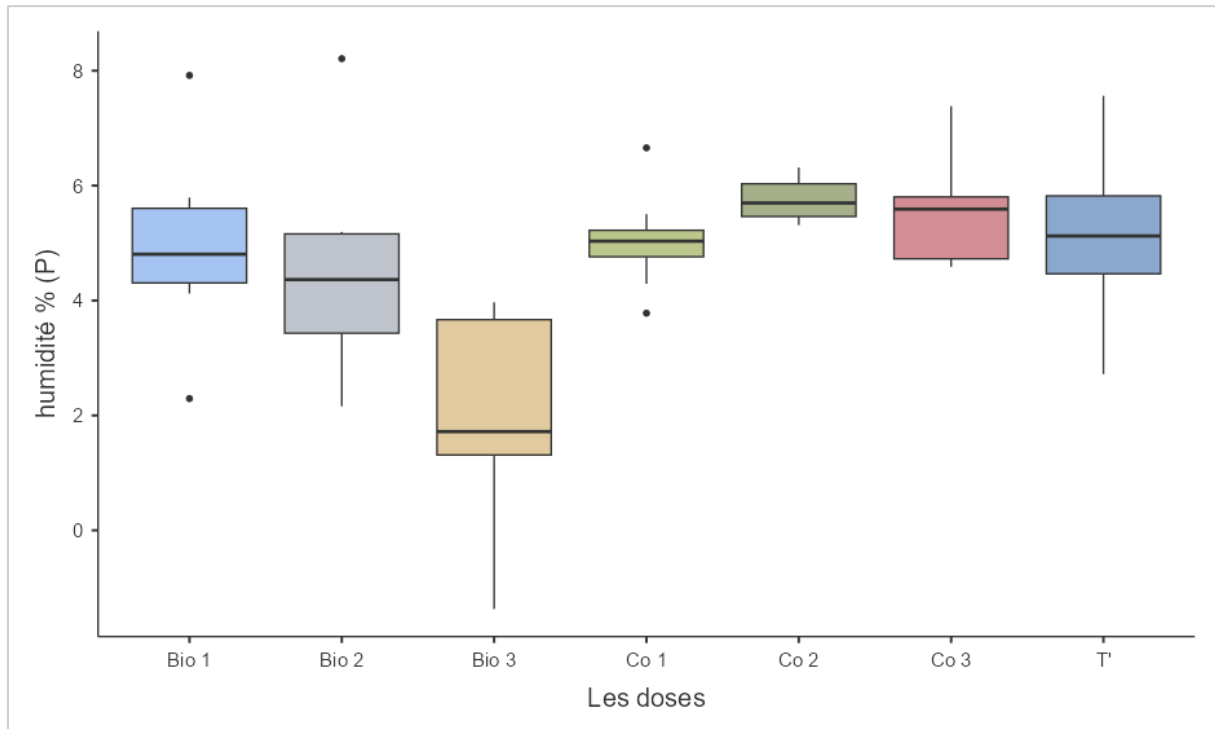


Figure 18. Variation de la teneur en humidité (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en humidité des pailles est globalement peu influencée par les doses faibles à modérées de biochar et de compost, mais qu'elle est significativement affectée par la dose élevée de biochar. Le témoin (T') a présenté une humidité moyenne de $5,17 \pm 1,51$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($4,92 \pm 1,52$ %), Bio 2 ($4,42 \pm 1,75$ %), Co 1 ($5,02 \pm 0,80$ %), Co 2 ($5,76 \pm 0,36$ %) et Co 3 ($5,54 \pm 0,89$ %) n'ont montré aucune différence significative par rapport au témoin ($p > 0,05$). En revanche, la dose Bio 3 a entraîné une diminution hautement significative de l'humidité, avec une valeur moyenne de $1,87 \pm 1,80$ %, nettement inférieure à celle du témoin ($p < 0,001$). Ces résultats indiquent que seule une dose élevée de biochar est capable de modifier significativement le statut hydrique des pailles à la récolte.

La stabilité observée pour la majorité des traitements suggère que les processus de maturation et de dessiccation des plantes n'ont pas été modifiés par les doses faibles à modérées d'amendements. Cela est cohérent avec les observations de la littérature, selon lesquelles les amendements organiques influencent davantage la croissance et le rendement que les caractéristiques physiques finales des résidus végétaux, sauf lorsque les modifications des

propriétés du sol deviennent importantes. Liu *et al.* (2013) ont ainsi montré que les effets du biochar sur les paramètres qualitatifs restent généralement limités à faibles doses.

La diminution marquée de l'humidité observée avec la dose Bio 3 peut être expliquée par l'amélioration des propriétés hydriques du sol induite par le biochar. En augmentant la rétention et la redistribution de l'eau dans le sol, le biochar favorise un développement végétatif plus efficace et une maturation plus rapide des tissus, conduisant à une dessiccation plus avancée à la récolte. Razzaghi *et al.* (2020) ont montré que le biochar modifie la dynamique de l'eau dans le sol, ce qui peut améliorer le statut hydrique des plantes pendant la croissance et accélérer leur sénescence et leur dessèchement en fin de cycle. Cette meilleure régulation hydrique peut ainsi expliquer la faible teneur en humidité observée dans les pailles du traitement Bio 3.

La réduction de l'humidité constitue un avantage important pour la conservation des fourrages. Une humidité inférieure à 10–15 % est généralement considérée comme favorable pour limiter le développement de moisissures et assurer une bonne stabilité au stockage (McDonald *et al.*, 2011). Dans ce contexte, les pailles issues du traitement Bio 3, avec une humidité très faible, présentent un excellent potentiel de conservation, ce qui permet de réduire les pertes post-récolte et d'assurer une disponibilité continue de fourrage pour les ruminants.

Cependant, une teneur très faible en humidité est souvent associée à une augmentation de la rigidité des tissus végétaux et à une concentration plus élevée en fibres lignifiées. Or, la lignification est un facteur limitant majeur de la digestibilité des fourrages, car elle réduit l'accessibilité des parois cellulaires aux micro-organismes du rumen. La digestibilité de la paille de blé, généralement comprise entre 40 et 50 % de la matière sèche, peut diminuer lorsque la lignification augmente (Van Soest, 1994). Ainsi, bien que la diminution de l'humidité améliore la conservation, elle peut s'accompagner d'une légère réduction de la valeur nutritive, nécessitant une complémentation en aliments plus digestibles pour équilibrer les rations.

Ces résultats mettent en évidence que l'application de biochar à forte dose améliore nettement la qualité technologique des pailles en termes de conservation, mais que son impact sur la valeur alimentaire doit être évalué en tenant compte de la digestibilité et de la composition en fibres, afin d'optimiser son utilisation dans les systèmes de production animale.

4. Teneur en cendres (matière minérale) et la matière organique

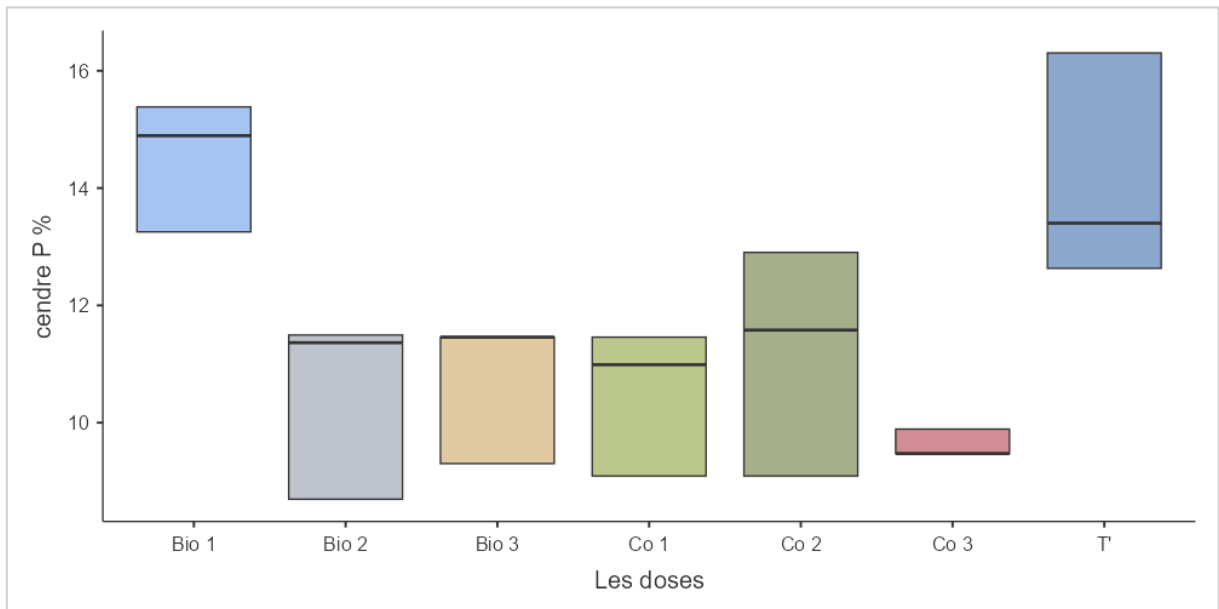


Figure 19. Variation de la teneur en cendres (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

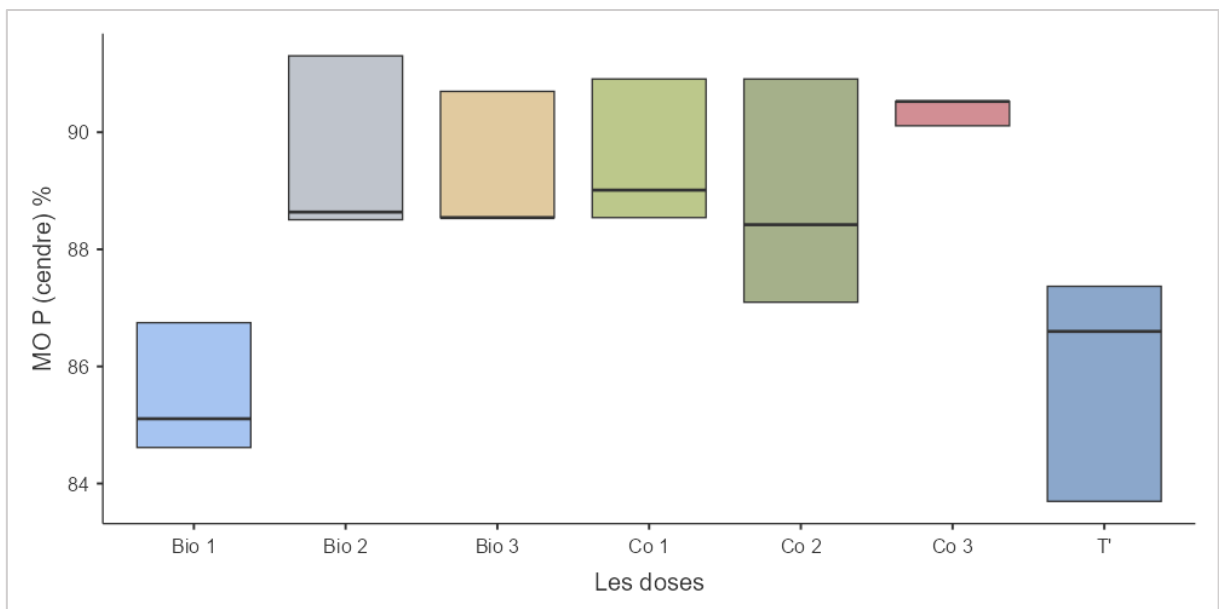


Figure. Variation de la matière organique (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en cendres et en matière organique des pailles est significativement influencée par les doses de biochar et de compost appliqué, avec une évolution inverse entre ces deux paramètres. Le témoin (T') présente une teneur en cendres de

14,11 $\pm$ 1,68 %, tandis que le traitement Bio 1 (14,51 $\pm$ 0,97 %) ne montre aucune différence significative ($p > 0,05$). En revanche, les traitements Bio 2 (10,52 $\pm$ 1,37 %), Bio 3 (10,74 $\pm$ 1,08 %), Co 1 (10,51 $\pm$ 1,09 %), Co 2 (11,19 $\pm$ 1,68 %) et Co 3 (9,61 $\pm$ 0,21 %) présentent une diminution significative de la matière minérale ($p < 0,05$). Parallèlement, la matière organique suit une tendance inverse, avec une augmentation significative pour ces mêmes traitements, atteignant des valeurs comprises entre 88,8 % et 90,4 %, contre 85,9 $\pm$ 1,68 % pour le témoin. Ces résultats indiquent que la majorité des doses de biochar et de compost favorisent une augmentation de la fraction organique des pailles au détriment de la fraction minérale.

Cette relation inverse entre matière minérale et matière organique peut être expliquée par un effet de dilution lié à l'augmentation de la biomasse végétale. En effet, lorsque la croissance de la plante est stimulée, notamment par l'amélioration des conditions du sol induite par le biochar et le compost, la synthèse de composés organiques structuraux tels que la cellulose et l'hémicellulose est favorisée, ce qui entraîne une réduction relative de la proportion des minéraux dans les tissus végétaux. Ce phénomène a été largement décrit en agronomie végétale, où l'augmentation de la biomasse s'accompagne souvent d'une dilution des éléments minéraux dans la matière sèche (Jarrell et Beverly, 1981). De plus, l'amélioration de la structure du sol et de l'activité microbienne sous l'effet des amendements organiques peut favoriser l'assimilation du carbone et la production de matière organique végétale (Agegnehu *et al.*, 2017).

L'augmentation de la matière organique constitue un avantage important, car elle correspond à la fraction potentiellement digestible de la paille. La matière organique des fourrages comprend principalement les glucides structuraux (cellulose, hémicellulose) et, dans une moindre mesure, les composés solubles, qui représentent la principale source d'énergie pour les ruminants. Toutefois, la digestibilité de cette fraction dépend fortement de sa composition, notamment de la teneur en lignine, qui limite l'accessibilité des fibres aux micro-organismes du rumen (Van Soest, 1994). Une augmentation de la matière organique ne se traduit donc pas nécessairement par une amélioration de la valeur nutritive si elle s'accompagne d'une augmentation de la lignification.

En revanche, la diminution de la teneur en cendres peut avoir des implications nutritionnelles, car cette fraction représente l'ensemble des minéraux essentiels pour les animaux, tels que le calcium, le phosphore, le potassium et le magnésium. La paille de blé est déjà naturellement pauvre en minéraux, avec une teneur en cendres généralement comprise entre 8 et 15 % de la matière sèche (McDonald *et al.*, 2011). Une diminution supplémentaire

de cette fraction peut donc accentuer les carences minérales, nécessitant une supplémentation dans les rations, en particulier pour les animaux en croissance ou en production.

Ainsi, les résultats obtenus suggèrent que les amendements organiques, notamment à doses modérées à élevées, permettent d'augmenter la fraction organique des pailles, ce qui peut être favorable du point de vue énergétique, mais qu'ils peuvent également réduire leur valeur minérale. Dans les systèmes de production animale, ces pailles pourraient être mieux valorisées en combinaison avec des compléments minéraux afin d'assurer un équilibre nutritionnel optimal. Ces observations confirment l'importance d'une approche intégrée tenant compte à la fois de la quantité et de la qualité des fourrages produits.

5. Teneur en amidon et en amylose des pailles

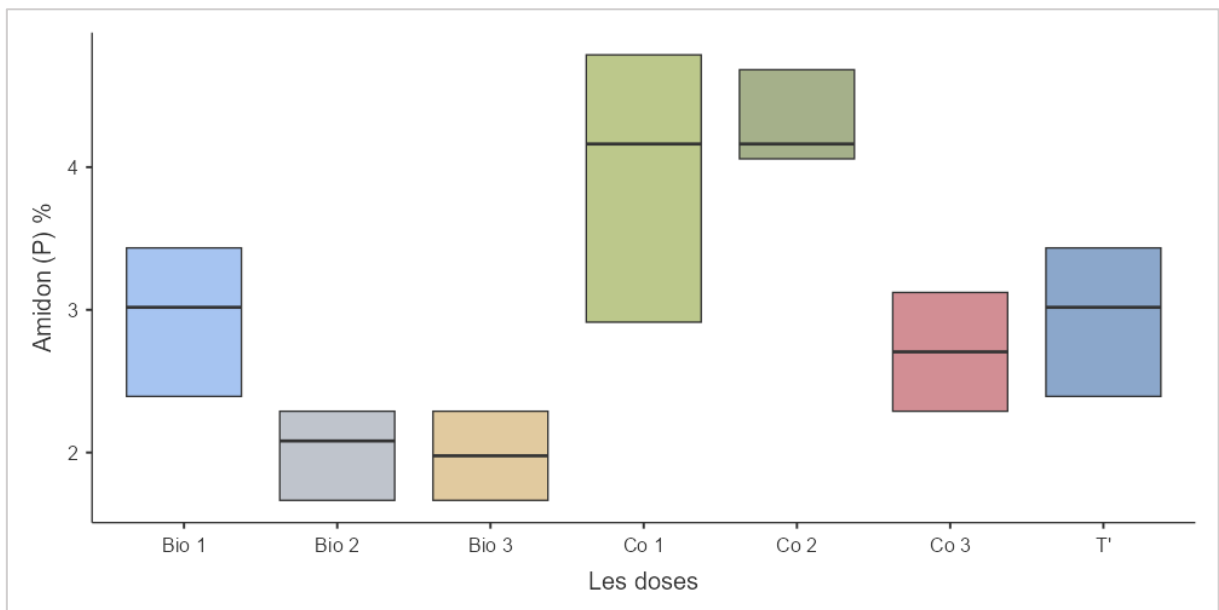


Figure 20. Variation de la teneur en amidon (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

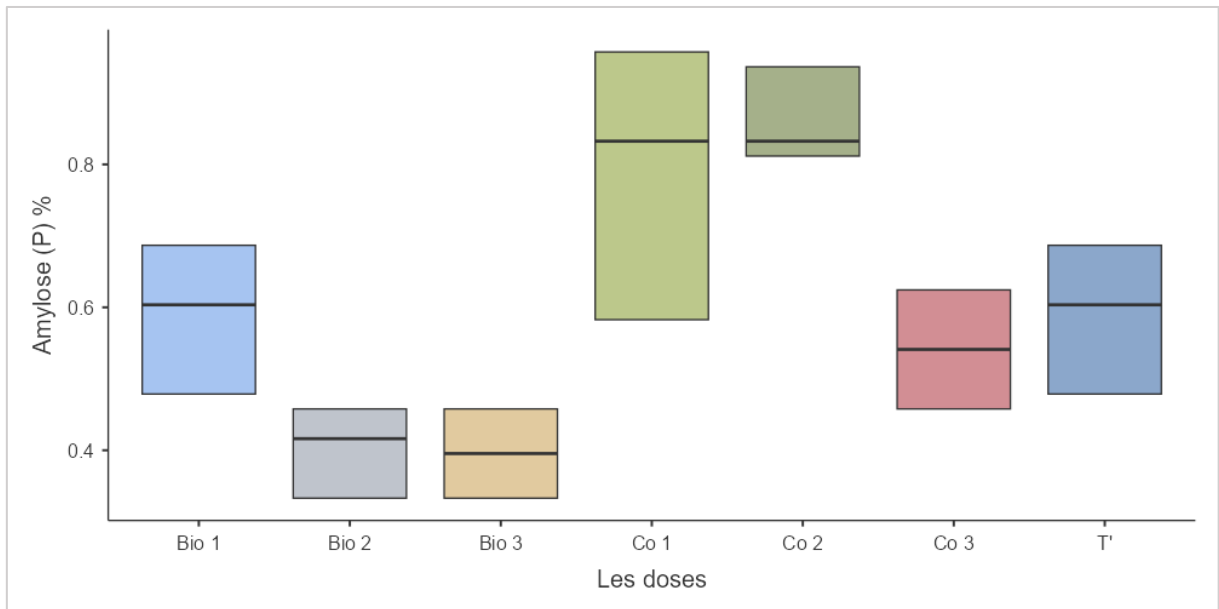


Figure 21. Variation de la teneur en amylose (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en amidon et en amylose des pailles est influencée de manière différenciée par les doses de biochar et de compost appliqué, avec des tendances similaires pour ces deux paramètres. Le témoin (T') présente une teneur en amidon de $2,95 \pm 0,45$ % et en amylose de $0,590 \pm 0,091$ %, valeurs comparables à celles des traitements Bio 1 et Co 3, pour lesquels aucune différence significative n'a été observée ($p > 0,05$). En revanche, les traitements Bio 2 et Bio 3 ont entraîné une diminution significative de ces deux fractions glucidiques, avec des valeurs d'amidon proches de 2,0 % et d'amylose inférieures à 0,40 % ($p < 0,05$). À l'inverse, les traitements Co 1 et Co 2 ont montré une augmentation significative de l'amidon (jusqu'à $4,30 \pm 0,29$ %) et de l'amylose (jusqu'à $0,860 \pm 0,058$ %) par rapport au témoin ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que certaines doses de biochar réduisent l'accumulation des glucides dans les pailles, tandis que le compost, en particulier à doses intermédiaires, favorise leur accumulation.

La diminution de l'amidon et de l'amylose observée dans les traitements Bio 2 et Bio 3 peut être expliquée par une redistribution des assimilats au sein de la plante. En effet, le biochar, en améliorant les conditions de croissance, peut favoriser le transfert des assimilats vers les organes reproducteurs (grains) ou vers la production globale de biomasse, ce qui réduit leur accumulation dans les pailles. Ce phénomène est cohérent avec les observations rapportées dans la littérature, où l'amélioration des conditions de croissance peut modifier la partition du carbone entre les différents organes végétaux (Liu *et al.*, 2013). De plus, un effet de dilution lié

à l'augmentation de la biomasse peut également contribuer à la réduction relative des glucides dans les résidus végétatifs.

À l'inverse, l'augmentation significative de l'amidon et de l'amylose observée dans les traitements Co 1 et Co 2 suggère que le compost favorise l'accumulation de glucides dans les tissus végétatifs. Cet effet peut être attribué à l'apport direct de nutriments et à l'amélioration de la fertilité du sol, qui stimulent la photosynthèse et la production d'assimilats. Une nutrition minérale équilibrée, notamment en azote et en potassium, est connue pour favoriser la synthèse et le stockage des glucides dans les plantes (Taiz *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'activité microbienne accrue dans les sols amendés avec du compost peut améliorer la disponibilité des nutriments, contribuant ainsi à une accumulation plus importante de réserves glucidiques dans les pailles.

Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte de la faible contribution des glucides non structuraux dans la paille de blé. En effet, la paille contient généralement moins de 5 % d'amidon, la majeure partie de l'énergie étant apportée par les fibres structurales (Van Soest, 1994). Ainsi, même si les augmentations observées avec les traitements Co 1 et Co 2 améliorent légèrement la teneur en glucides disponibles, leur impact sur la valeur énergétique globale reste limité. À titre indicatif, la valeur énergétique de la paille de blé se situe généralement autour de 0,4 à 0,5 UFL/kg de matière sèche chez les ruminants, en raison de sa forte teneur en fibres et de sa faible digestibilité (INRA, 2018).

Cependant, une augmentation des glucides solubles ou facilement hydrolysables peut améliorer la fermentation ruminale en fournissant une source d'énergie rapidement disponible pour les micro-organismes, ce qui peut favoriser la digestion des fibres lorsque les rations sont correctement équilibrées. À l'inverse, la diminution de l'amidon et de l'amylose observée avec les traitements Bio 2 et Bio 3 pourrait réduire légèrement cette contribution énergétique, mais cet effet reste secondaire par rapport à l'importance des fractions fibreuses dans la paille. Ainsi, dans une perspective de nutrition animale, ces variations de l'amidon et de l'amylose dans les pailles ont un impact limité, mais peuvent contribuer à affiner la qualité énergétique globale lorsqu'elles sont intégrées dans des rations équilibrées.

6. Teneur en amylopectine des pailles

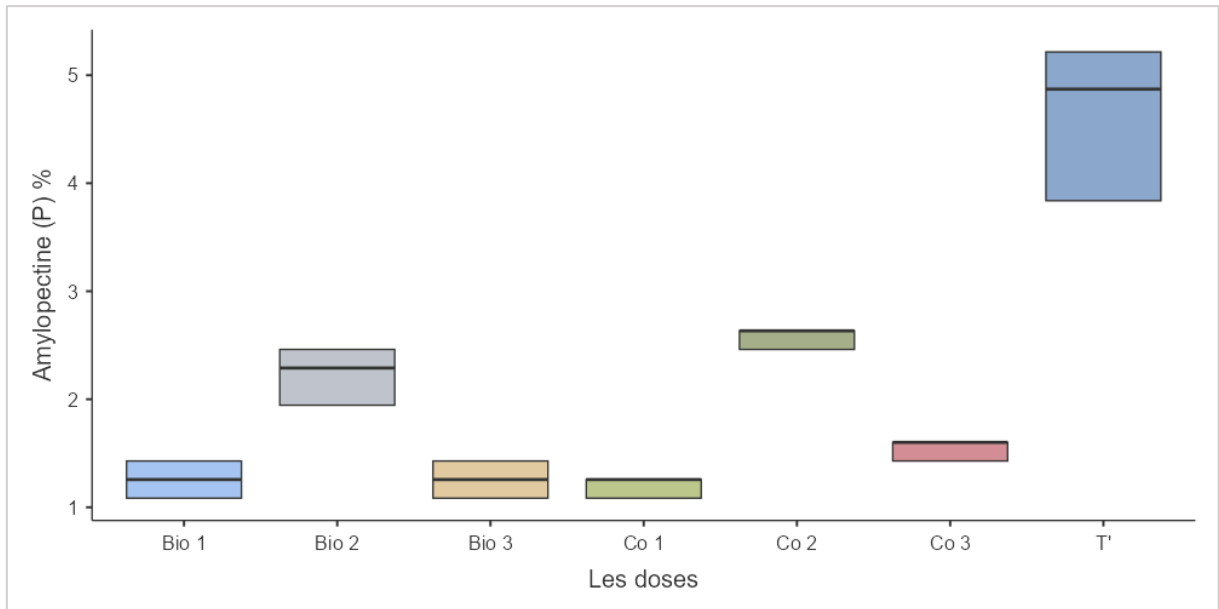


Figure 22. Variation de la teneur en amylopectine (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en amylopectine des pailles est significativement influencée par les différentes doses de biochar et de compost appliqué, avec une diminution marquée pour l'ensemble des traitements par rapport au témoin. Ce dernier présente la valeur la plus élevée ($4,64 \pm 0,62$ %), tandis que les traitements Bio 1 ($1,26 \pm 0,15$ %), Bio 2 ($2,23 \pm 0,23$ %), Bio 3 ($1,26 \pm 0,15$ %), Co 1 ($1,20 \pm 0,09$ %), Co 2 ($2,58 \pm 0,09$ %) et Co 3 ($1,54 \pm 0,09$ %) montrent tous des valeurs significativement inférieures ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que, indépendamment du type d'amendement ou de la dose appliquée, la teneur en amylopectine des pailles diminue de manière systématique.

Cette diminution généralisée peut être interprétée comme une modification du métabolisme glucidique dans les tissus végétatifs sous l'effet des amendements organiques. Le biochar et le compost, en améliorant les conditions de croissance et la disponibilité des nutriments, peuvent favoriser une redistribution des assimilats vers les organes prioritaires tels que les grains ou vers la production globale de biomasse, au détriment du stockage de glucides non structuraux dans les pailles. Ce phénomène est cohérent avec les observations de la littérature montrant que les conditions de nutrition et de croissance influencent fortement la partition du carbone au sein de la plante (Liu *et al.*, 2013). Par ailleurs, l'augmentation de la biomasse végétative observée dans certains traitements peut entraîner un effet de dilution, réduisant la concentration relative

des composés solubles tels que l'amylopectine.

Une autre explication possible réside dans la modification de l'activité enzymatique impliquée dans la biosynthèse de l'amidon. Les enzymes responsables de la formation des chaînes ramifiées de l'amylopectine peuvent être affectées par les conditions nutritionnelles et physiologiques induites par les amendements, ce qui peut limiter l'accumulation de cette fraction dans les pailles. Des études ont montré que la disponibilité en azote et en autres nutriments peut influencer la synthèse et la répartition des glucides dans les plantes (Taiz *et al.*, 2015).

La diminution de l'amylopectine dans les pailles a un impact relativement limité mais reste à considérer. L'amylopectine représente la fraction la plus digestible de l'amidon, en raison de sa structure ramifiée qui facilite l'action des enzymes digestives. Toutefois, dans la paille de blé, la teneur en amidon est généralement très faible, souvent inférieure à 5 % de la matière sèche, et l'énergie est principalement fournie par les fibres structurales (Van Soest, 1994). Ainsi, même si la réduction de l'amylopectine peut diminuer légèrement la disponibilité énergétique rapide, son impact global sur la valeur nutritive reste modéré.

En revanche, cette diminution confirme que la paille issue des traitements étudiés reste un fourrage pauvre en glucides rapidement fermentescibles, ce qui peut être avantageux dans certaines situations alimentaires. Une faible teneur en glucides solubles limite les risques de fermentation rapide et d'acidose ruminale, contribuant à une meilleure stabilité digestive lorsque la paille est utilisée comme complément fibreux dans les rations. Selon McDonald *et al.* (2011), les fourrages pauvres en glucides solubles jouent un rôle important dans l'équilibre des rations en apportant des fibres structurales essentielles au bon fonctionnement du rumen.

Ainsi, les résultats obtenus montrent que l'application de biochar et de compost réduit la teneur en amylopectine des pailles, sans compromettre de manière significative leur rôle principal en alimentation animale, qui reste celui de source de fibres. Toutefois, ces variations doivent être prises en compte dans une approche globale de formulation des rations, afin d'assurer un équilibre optimal entre énergie rapidement disponible et fibres structurales.

7. Sucres totaux des pailles

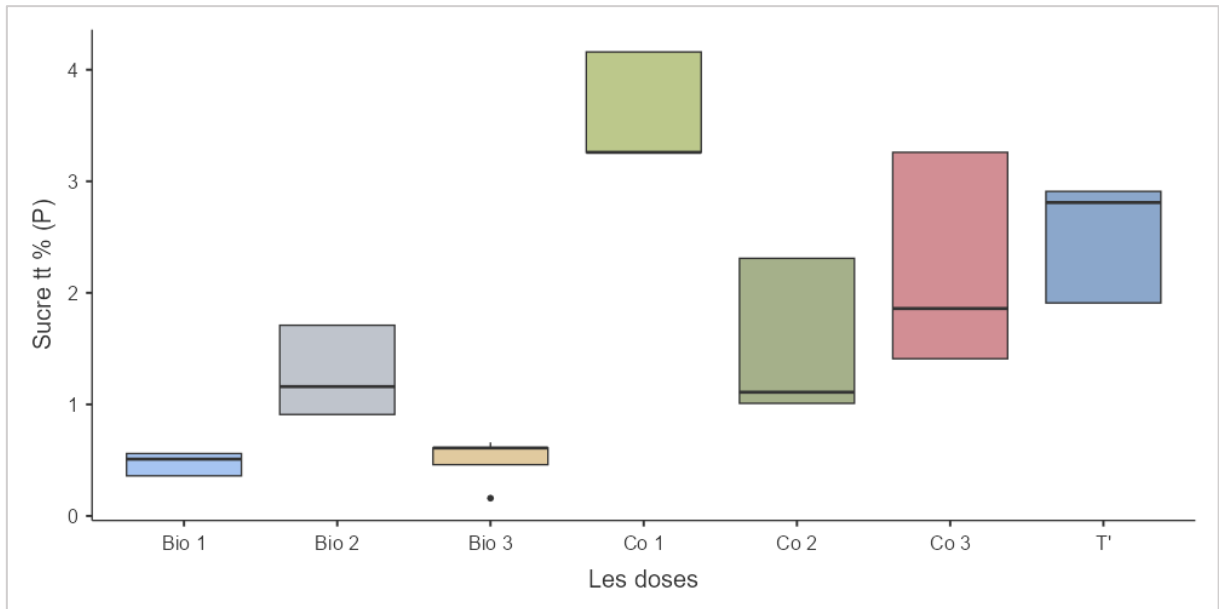


Figure 23. Variation de la teneur en sucres totaux (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en sucres totaux des pailles est influencée de manière variable par les doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') présente une teneur moyenne de $2,54 \pm 0,48$ %, tandis que plusieurs traitements, notamment Bio 1 ($0,48 \pm 0,09$ %), Bio 2 ($1,26 \pm 0,35$ %), Bio 3 ($0,52 \pm 0,16$ %) et Co 2 ($1,48 \pm 0,63$ %), montrent une diminution significative de cette teneur ($p < 0,05$). En revanche, les traitements Co 1 ($3,56 \pm 0,45$ %) et Co 3 ($2,18 \pm 0,84$ %) ne diffèrent pas significativement du témoin ($p > 0,05$). Ces résultats indiquent que certaines doses de biochar et de compost peuvent réduire l'accumulation des sucres solubles dans les pailles, tandis que d'autres maintiennent une composition glucidique comparable au témoin.

La diminution significative des sucres totaux observée dans les traitements Bio 1, Bio 2, Bio 3 et Co 2 peut être expliquée par une redistribution des assimilats au sein de la plante. En effet, dans des conditions favorables à la croissance, les produits de la photosynthèse peuvent être davantage orientés vers les organes reproducteurs, notamment les grains, ou vers la production de biomasse structurale, ce qui réduit leur accumulation sous forme de sucres solubles dans les pailles. Ce phénomène est cohérent avec les observations de Liu *et al.* (2013), qui montrent que les amendements organiques peuvent modifier la répartition du carbone entre les différentes fractions végétales. De plus, l'augmentation de la matière organique et de la biomasse

végétative peut entraîner un effet de dilution, réduisant la concentration relative des sucres solubles dans les tissus.

À l'inverse, les traitements Co 1 et Co 3, qui n'ont pas montré de diminution significative, suggèrent que certaines doses de compost permettent de maintenir un équilibre entre la synthèse, le stockage et l'utilisation des glucides solubles. Cela peut être lié à une disponibilité plus progressive des nutriments issus du compost, favorisant un métabolisme plus stable et une répartition équilibrée des assimilats dans la plante. Des travaux ont montré que les amendements organiques peuvent soutenir l'activité photosynthétique et le métabolisme carboné sans perturber l'équilibre entre les différentes formes de glucides (Taiz *et al.*, 2015).

Les sucres solubles des pailles représentent une fraction énergétique rapidement fermentescible, bien que leur contribution reste faible en comparaison avec les grains. La paille de blé contient généralement moins de 5 % de glucides solubles, la majeure partie de son énergie étant fournie par les fibres structurales (Van Soest, 1994). Ainsi, la diminution observée dans certains traitements peut réduire légèrement la disponibilité immédiate de l'énergie pour les micro-organismes du rumen, mais cet effet reste limité dans l'ensemble de la ration.

Cependant, les sucres solubles jouent un rôle important dans l'initiation de la fermentation ruminale et dans l'activité microbienne. Leur présence favorise la production rapide d'acides gras volatils, contribuant à l'apport énergétique des ruminants. Une réduction excessive de ces sucres peut ralentir la fermentation, tandis qu'une teneur modérée contribue à une meilleure efficacité digestive (McDonald *et al.*, 2011). Ainsi, les traitements Co 1 et Co 3, qui maintiennent des niveaux de sucres comparables au témoin, peuvent être légèrement plus favorables pour soutenir la fermentation ruminale.

Globalement, ces résultats montrent que les variations de la teneur en sucres totaux des pailles, bien que significatives sur le plan statistique, ont un impact limité sur la valeur nutritive globale, dominée par les fractions fibreuses. Toutefois, elles peuvent influencer la dynamique de fermentation dans le rumen et doivent être prises en compte dans une approche globale de formulation des rations animales.

8. Sucres réducteurs des pailles

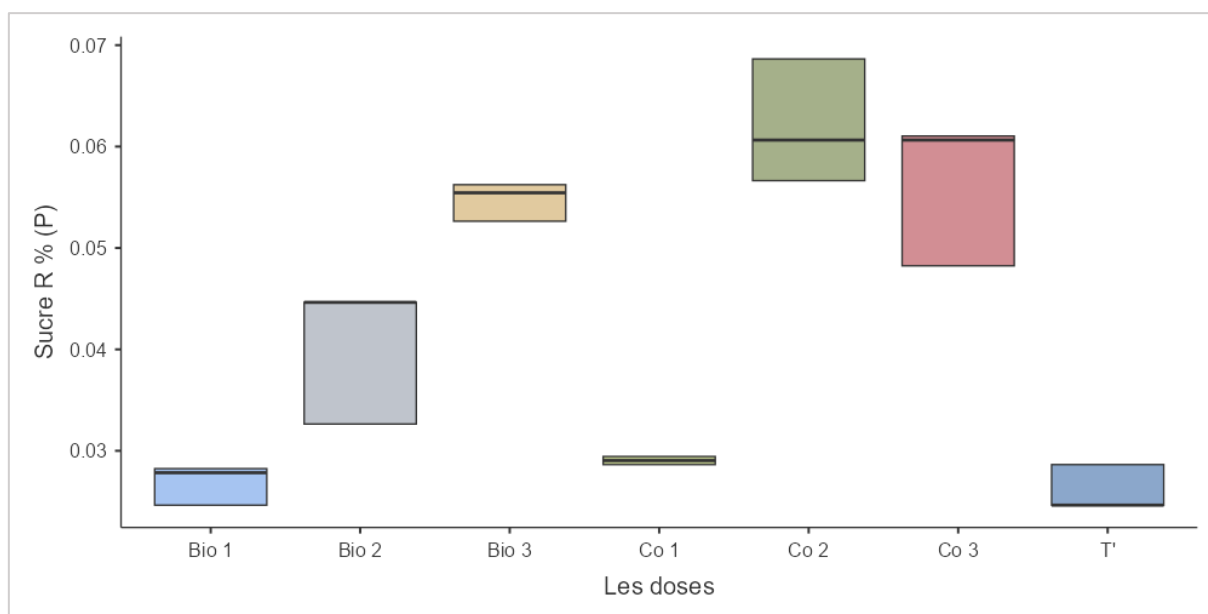


Figure 24. Variation de la teneur en sucres réducteurs (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en sucres réducteurs des pailles est influencée de manière significative par certaines doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') présente une teneur moyenne de $0,0260 \pm 0,0020$ %, tandis que les traitements Bio 1 ($0,0269 \pm 0,0017$ %) et Co 1 ($0,0290 \pm 0,0003$ %) ne diffèrent pas significativement de cette valeur ($p > 0,05$). En revanche, les traitements Bio 2 ($0,0406 \pm 0,0060$ %), Bio 3 ($0,0548 \pm 0,0016$ %), Co 2 ($0,0620 \pm 0,0053$ %) et Co 3 ($0,0566 \pm 0,0063$ %) présentent une augmentation significative des sucres réducteurs ($p < 0,05$). Ces résultats indiquent que certaines doses intermédiaires à élevées d'amendements favorisent l'accumulation de sucres simples dans les pailles, tandis que les faibles doses n'ont pas d'effet notable.

L'absence d'effet significatif observée pour Bio 1 et Co 1 suggère que les doses faibles à modérées n'altèrent pas le métabolisme des glucides solubles dans les tissus végétatifs, ce qui traduit un équilibre entre la production, le transport et l'utilisation des sucres au cours du développement de la plante. En revanche, l'augmentation significative observée pour Bio 2, Bio 3, Co 2 et Co 3 peut être attribuée à une intensification du métabolisme carboné, liée à l'amélioration des conditions de croissance induite par les amendements. Le biochar et le compost sont connus pour améliorer la disponibilité des nutriments, la structure du sol et l'activité microbienne, ce qui favorise la photosynthèse et la production d'assimilats. Une partie

de ces assimilats peut être stockée sous forme de sucres simples dans les tiges, notamment lorsque la croissance végétative est stimulée (Taiz *et al.*, 2015). Par ailleurs, une augmentation de l'activité enzymatique impliquée dans l'hydrolyse des polysaccharides peut également contribuer à cette accumulation de sucres réducteurs.

L'augmentation des sucres réducteurs dans les pailles constitue un élément intéressant, bien que son impact reste modéré. Les sucres simples représentent une source d'énergie rapidement fermentescible dans le rumen, contribuant à la production d'acides gras volatils, principaux substrats énergétiques des ruminants. Une augmentation de ces composés peut améliorer l'efficacité de la fermentation et favoriser l'activité microbienne, en particulier lorsque la ration est pauvre en glucides solubles. Toutefois, la teneur en sucres réducteurs dans la paille de blé reste très faible, généralement inférieure à 1 % de la matière sèche, ce qui limite leur contribution énergétique globale (Van Soest, 1994).

En outre, une augmentation modérée des sucres solubles peut améliorer la palatabilité des pailles et encourager leur ingestion par les animaux, ce qui constitue un avantage dans les systèmes d'alimentation basés sur des fourrages grossiers. Cependant, contrairement aux grains ou aux fourrages riches, ces variations restent secondaires par rapport à l'importance des fractions fibreuses (NDF, ADF), qui déterminent principalement la digestibilité et la valeur énergétique de la paille. Selon McDonald *et al.* (2011), la valeur alimentaire des pailles est avant tout limitée par leur forte teneur en fibres lignifiées et leur faible digestibilité, ce qui implique que l'amélioration des sucres solubles ne compense que partiellement ces limitations.

9. Protéines des pailles

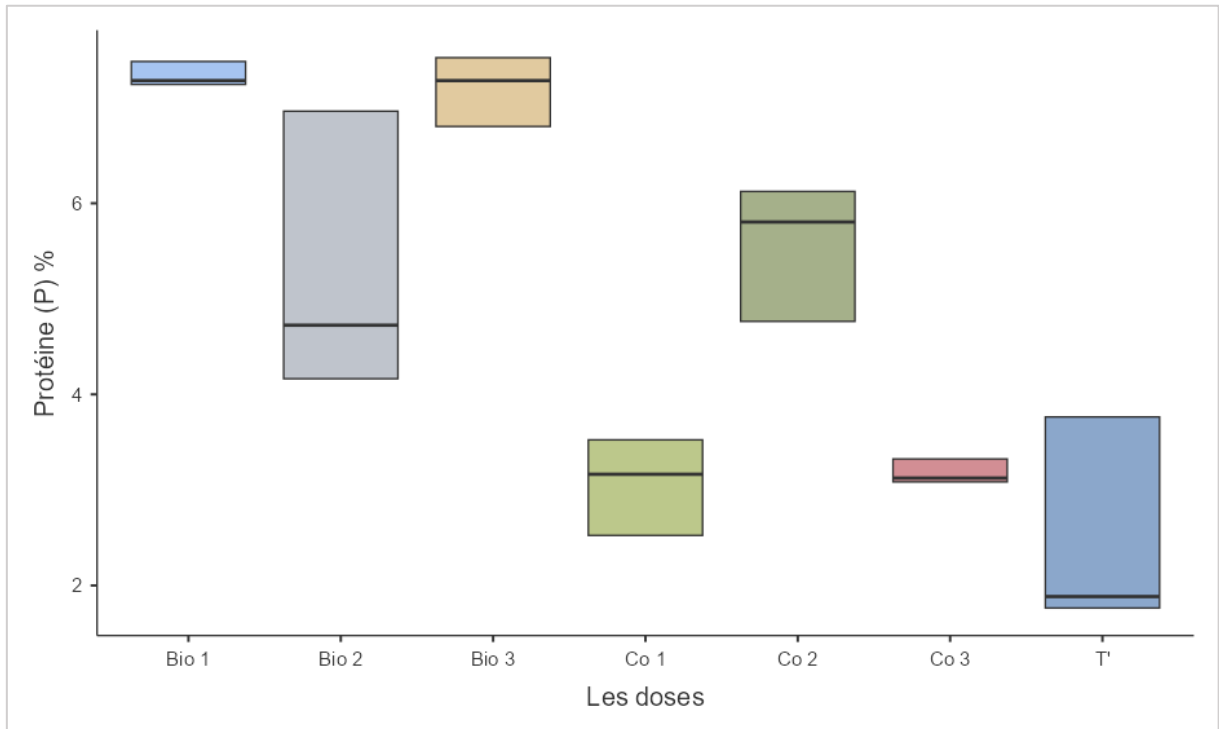


Figure 25. Variation de la protéines (%) des pailles de blé en fonction des doses de biochar et de compost

Les résultats obtenus montrent que la teneur en protéines des pailles est fortement influencée par les différentes doses de biochar et de compost appliqué. Le témoin (T') a présenté la plus faible valeur moyenne ($2,47 \pm 0,971$ %). Les traitements Co 1 ($3,07 \pm 0,439$ %) et Co 3 ($3,18 \pm 0,111$ %) ont montré des teneurs légèrement supérieures à celle du témoin, mais sans différence significative ($p > 0,05$). En revanche, le traitement Co 2 ($5,56 \pm 0,616$ %) a présenté une augmentation significative par rapport au témoin ($p < 0,001$).

Les traitements au biochar ont globalement montré des teneurs plus élevées. Bio 2 ($5,28 \pm 1,283$ %) est significativement supérieur au témoin ($p < 0,001$), tandis que Bio 1 ($7,34 \pm 0,111$ %) et Bio 3 ($7,20 \pm 0,317$ %) présentent les valeurs les plus élevées, significativement supérieures à celles du témoin et de la plupart des traitements ($p < 0,001$). En comparaison entre traitements, Bio 1 et Bio 3 ne diffèrent pas significativement entre eux ($p = 1,000$), indiquant des effets similaires. En revanche, Bio 1 est significativement supérieur à Bio 2, Co 1, Co 2 et Co 3 ($p < 0,001$). De même, Bio 3 est significativement supérieur à Bio 2, Co 1, Co 2 et Co 3 ($p < 0,001$). Par ailleurs, aucune différence significative n'a été observée entre Co 1 et Co 3 ($p = 1,000$), ni entre Co 1 et le témoin ($p > 0,05$).

Globalement, ces résultats indiquent que les traitements au biochar, en particulier Bio 1 et Bio 3, favorisent fortement l'accumulation des protéines dans les pailles, tandis que les traitements au compost montrent des effets plus variables, avec une amélioration notable uniquement pour la dose Co 2.

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études qui montrent que le biochar peut améliorer la disponibilité de l'azote dans le sol et réduire les pertes par lessivage, favorisant ainsi l'accumulation d'azote dans les tissus végétatifs (Lehmann et Joseph, 2015). De plus, le biochar stimule l'activité microbienne du sol et améliore l'efficacité d'utilisation de l'azote, ce qui peut expliquer les teneurs élevées observées dans les pailles (Agegnehu *et al.*, 2017). Concernant le compost, son effet dépend fortement de la dose appliquée et de la minéralisation de l'azote, ce qui explique les résultats plus variables observés, comme rapporté par Diacono et Montemurro (2010).

Dans le cas du blé, plusieurs travaux ont montré que l'amélioration de la nutrition azotée augmente non seulement la teneur en protéines des grains, mais aussi celle des résidus végétaux, notamment les pailles (Fageria, 2014).

L'augmentation de la teneur en protéines des pailles constitue un avantage important, car les pailles sont généralement pauvres en azote (souvent < 3 % de la matière sèche). Une amélioration de cette teneur peut favoriser l'activité microbienne dans le rumen, améliorer la digestibilité des fibres et augmenter l'ingestion volontaire des fourrages (Van Soest, 1994). En effet, un apport minimal en azote est nécessaire pour assurer une fermentation optimale dans le rumen.

Conclusion

Conclusion et perspectives

L'ensemble des résultats obtenus met en évidence que l'effet des amendements organiques, notamment le biochar et le compost, dépend fortement des doses appliquées et des paramètres étudiés, avec des réponses différenciées entre les grains et les pailles du blé fourrager. De manière générale, les doses faibles à modérées de biochar et de compost n'ont pas entraîné de modifications significatives pour la majorité des variables étudiées, que ce soit en termes de rendement, de composition chimique ou de qualité nutritionnelle. En revanche, la dose élevée de biochar (Bio 3) s'est distinguée par un effet marqué sur la production, avec une biomasse aérienne atteignant $2305 \pm 310,7$ g/m² contre $635 \pm 84,9$ g/m² chez le témoin, soit une augmentation d'environ 3,6 fois ($p < 0,001$). Le rendement en grain est passé de $326 \pm 60,6$ g/m² chez le témoin à $1197 \pm 101,3$ g/m² avec Bio 3, correspondant à une hausse de 266,9 % ($p < 0,001$), tandis que le rendement en matière sèche des grains a atteint $1092 \pm 93,0$ g/m² contre $301 \pm 55,3$ g/m² chez le témoin. Concernant les pailles, le rendement a également fortement augmenté avec Bio 3 pour atteindre $1197 \pm 101,3$ g/m² contre $326 \pm 60,6$ g/m², alors que la matière sèche des pailles est passée de $187 \pm 48,1$ g/m² à $628 \pm 66,4$ g/m² ($p < 0,001$). La teneur en matière sèche des pailles a augmenté jusqu'à $98,1 \pm 1,66$ % contre $94,8 \pm 1,24$ %, tandis que l'humidité a fortement diminué de $5,17 \pm 1,51$ % à $1,87 \pm 1,80$ %, indiquant une meilleure aptitude à la conservation des fourrages.

Concernant la qualité des grains, les résultats montrent que, malgré l'augmentation significative du rendement observée avec certaines doses, notamment Bio 3, la plupart des paramètres qualitatifs tels que la matière sèche, l'indice de récolte et la composition en amidon restent globalement stables. Toutefois, certaines modifications ont été observées, notamment une augmentation importante des sucres totaux, atteignant jusqu'à $51,4 \pm 8,88$ % pour Co 2 contre $15,3 \pm 7,33$ % chez le témoin ($p < 0,001$), ainsi qu'une augmentation des protéines des grains jusqu'à $6,75 \pm 0,98$ % pour Co 3 contre $4,88 \pm 1,31$ % chez le témoin. Les traitements compostés ont également favorisé un enrichissement minéral important, avec une teneur en cendres atteignant $5,74 \pm 0,68$ % pour Co 1 contre seulement $1,30 \pm 0,76$ % chez le témoin. À l'inverse, une diminution significative de l'amidon a été observée avec Co 3 ($18,1 \pm 2,66$ % contre $30,2 \pm 6,31$ % ; $p < 0,001$). Ces changements traduisent une modification du métabolisme carboné sans altérer de manière significative la qualité globale des grains, qui conservent une bonne valeur énergétique et nutritive.

En ce qui concerne les pailles, les résultats montrent que les amendements influencent davantage la composition que la production, à l'exception de la dose Bio 3 qui a significativement augmenté le rendement. Une tendance générale à l'augmentation de la matière organique a été observée, atteignant environ 90,4 % contre $85,9 \pm 1,68$ % chez le témoin, accompagnée d'une diminution des cendres jusqu'à $9,61 \pm 0,21$ % pour Co 3 contre $14,11 \pm 1,68$ % chez le témoin. Les protéines des pailles ont montré une amélioration particulièrement importante sous l'effet du biochar, avec des teneurs atteignant $7,34 \pm 0,11$ % pour Bio 1 et $7,20 \pm 0,31$ % pour Bio 3, soit près de trois fois supérieures à celle du témoin ($2,47 \pm 0,97$ % ; $p < 0,001$). Le traitement Co 2 a également présenté une augmentation

significative des protéines des pailles ($5,56 \pm 0,61$ %). Les sucres réducteurs ont atteint leurs valeurs les plus élevées avec Co 2 ($0,0620 \pm 0,0053$ %) et Bio 3 ($0,0548 \pm 0,0016$ %) contre $0,0260 \pm 0,0020$ % chez le témoin. Malgré ces améliorations, les variations des glucides non structuraux restent relativement faibles, confirmant que la paille demeure un fourrage pauvre en énergie rapidement disponible.

Du point de vue de la valorisation en production animale, ces résultats montrent que l'application de biochar à forte dose permet d'améliorer significativement la disponibilité en fourrage, tant en grains qu'en pailles, ce qui constitue un avantage majeur dans les systèmes d'élevage, notamment en conditions extensives ou en zones à ressources limitées. L'augmentation des protéines dans les grains et surtout dans les pailles représente également un intérêt nutritionnel important pour l'alimentation des ruminants, car elle peut améliorer l'activité microbienne ruminale et la valorisation des fibres. Cependant, l'augmentation de la quantité de biomasse ne s'accompagne pas toujours d'une amélioration proportionnelle de la qualité nutritionnelle, en particulier pour les pailles dont la digestibilité reste limitée par leur teneur élevée en fibres lignifiées. Ainsi, leur utilisation nécessite une complémentation adaptée en énergie et en minéraux afin de couvrir les besoins des animaux.

En conclusion, les amendements organiques, en particulier le biochar à dose élevée, présentent un potentiel très intéressant pour améliorer la productivité du blé fourrager et la disponibilité des ressources alimentaires pour les animaux. Toutefois, leur effet sur la qualité nutritionnelle reste modéré, ce qui souligne l'importance d'une gestion raisonnée des doses et d'une approche intégrée combinant fertilisation, production végétale et formulation des rations animales afin d'optimiser les performances globales des systèmes agricoles et d'élevage. Il serait ainsi pertinent d'approfondir l'évaluation des fractions fibreuses (NDF, ADF), de la digestibilité de la matière sèche et des performances zootechniques afin de mieux valoriser les pailles dans les systèmes d'élevage, notamment dans les zones à ressources fourragères limitées.

Références

Références

- Ain, Q.-, Shafiq, M., Nazir, A., & Bareen, F.-. (2023). Fertilizer perspective of biochar and compost derived from biomass of *Parthenium hysterophorus* in the rice wheat system in Punjab, Pakistan. *Journal of Plant Nutrition*, 46(10), 2434-2450. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2155555>
- Agegehu, G., Bass, A. M., Nelson, P. N., & Bird, M. I. (2017). *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. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.054>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). *Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment*. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). *Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: A meta-analysis*. *GCB Bioenergy*, 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
- Caldara, M., Gullì, M., Graziano, S., Riboni, N., Maestri, E., Mattarozzi, M., Bianchi, F., Careri, M., & Marmiroli, N. (2024). Microbial consortia and biochar as sustainable biofertilisers : Analysis of their impact on wheat growth and production. *Science of The Total Environment*, 917, 170168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170168>
- Cassman, K. G., Dobermann, A., Walters, D. T., & Yang, H. (2003). *Meeting cereal demand while protecting natural resources*. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 315–358. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122858>
- Chan, K. Y., & Xu, Z. (2009). *Biochar: Nutrient properties and their enhancement*. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management* (pp. 67–84). Earthscan.
- CIBE. (2018). Méthodes de mesure du taux de cendres – Fiche 18 (Réf. 010367). Comité Interprofessionnel du Bois-Énergie.
- Diacono, M., & Montemurro, F. (2010). Long-term effects of organic amendments on soil fertility. *Agronomy for Sustainable Development*, 30, 401–422. <https://doi.org/10.1051/agro/2009040>
- Dupont, F. M., & Simon, J. E. (2010). *Wheat: Chemistry and Technology*. AACC International.

- FAO (2013). *Climate change and food systems*.
- FAO (2018). *Wheat and nutrition*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fageria, N. K. (2014). Nitrogen management in crop production. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17435>
- Frontiers Review (2023). *A review on biochar's effect on soil properties and crop growth*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2023.1092637>
- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2nd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780471728384>
- Gunal, E. (2025). *Biochar-mediated changes in nutrient distribution and leaching patterns: insights from a soil column study*. PeerJ, 13, e18823. <https://peerj.com/articles/18823/>
- Hasan, A. K., Islam, S. S., Jahan, M., Kheya, S. A., Uddin, Md. R., Islam, Md. S., & Khomphet, T. (2024). Synergistic Effects of Vermicompost and Biochar Amendments on Soil Fertility and Wheat Productivity in Bangladesh Floodplain Soils. *Scientifica*, 2024(1), 6624984. <https://doi.org/10.1155/sci5/6624984>
- Hay, R. K. M. (1995). *Harvest index: A review of its use in plant breeding and crop physiology*. *Annals of Applied Biology*, 126(1), 197–216. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1995.tb05015.x>
- Herrero, M., Thornton, P. K., Notenbaert, A. M., et al. (2010). *Smart investments in sustainable food production*. *Science*, 327(5967), 822–825. <https://doi.org/10.1126/science.1183725>
- INRA (2018). *Alimentation des animaux domestiques : tables et recommandations*.
- INRA (2018). *Alimentation des ruminants (Tables INRA 2018)*. Quae Editions.
- Jarrell, W. M., & Beverly, R. B. (1981). *The dilution effect in plant nutrition studies*. *Advances in Agronomy*, 34, 197–224. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60887-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60887-1)
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). *Effects of biochar on crop productivity*. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Jung, H. G., & Allen, M. S. (1995). *Plant cell walls and digestibility*. *Journal of Animal Science*, 73(9), 2774–2790. <https://doi.org/10.2527/1995.7392774x>
- Khan, M. A., Basir, A., Fahad, S., Adnan, M., Saleem, M. H., Iqbal, A., Amanullah, Al-Huqail, A. A., Alosaimi, A. A., Saud, S., Liu, K., Harrison, M. T., & Nawaz, T. (2022). Biochar Optimizes Wheat Quality, Yield, and Nitrogen Acquisition in Low Fertile Calcareous Soil

- Treated With Organic and Mineral Nitrogen Fertilizers. *Frontiers in Plant Science*, 13, 879788. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879788>
- 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>
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). *Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review*. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11, 403–427.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Leogrande, R., Vitti, C., & Montemurro, F. (2024). *Organic fertilization improves durum wheat yield*. *Agronomy*, 14(2), 215. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020215>
- Li, X., Wu, D., Liu, X., Huang, Y., Cai, A., Xu, H., et al. (2024). *A global dataset of biochar application effects on crop yield, soil properties, and greenhouse gas emissions*. *Scientific Data*, 11, 57.
- Liu, C.-Y., Shepherd, K. W., & Rathjen, A. J. (1996). Improvement of durum wheat pastamaking and breadmaking qualities. *Cereal chemistry*, 73(2), 155-166.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., et al. (2013). *Biochar's effect on crop productivity*. *Plant and Soil*, 373, 583–594. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1806-x>
- Marschner, P. (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/book/9780123849052/marschner-s-mineral-nutrition-of-higher-plants>
- McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A., & Wilkinson, R. G. (2011). *Animal nutrition* (7th ed.). Pearson.
- Mohammadi, R., & Haghparast, R. (2022). Durum wheat: production, nutritional value and economic importance. *Cereal biotechnology and biochemistry*, 1(3), 414-445.
- Nocek, J. E. (1997). *Bovine acidosis*. *Journal of Dairy Science*, 80(5), 1005–1028. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76026-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76026-0)
- Peters Haugrud, A. R., Achilli, A. L., Martínez-Peña, R., & Klymiuk, V. (2025). Future of durum wheat research and breeding : Insights from early career researchers. *The Plant Genome*, 18(1), e20453. <https://doi.org/10.1002/tpg2.20453>
- Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., et al. (2015). *Biomass allocation*. *New Phytologist*, 193(1), 30–50. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>
- Preston, T. R., & Leng, R. A. (1987). *Matching ruminant production systems*. Penambul Books.

- Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). *Biochar and soil water retention*. *Geoderma*, 361, 114055. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055>
- Sadras, V. O., & Calderini, D. F. (2021). *Crop Physiology Case Histories*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-03024-8>
- Shewry, P. R. (2009). *Wheat*. *Journal of Experimental Botany*, 60(6), 1537–1553.
- Sinclair, T. R. (1998). Historical changes in harvest index and crop nitrogen accumulation. *Crop Science*, 38, 638–643.
- Spokas, K. A., Cantrell, K. B., Novak, J. M., Archer, D. W., Ippolito, J. A., Collins, H. P., et al. (2012). Biochar: A synthesis of its agronomic impact beyond carbon sequestration. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 973–989.
- Steel, R. G. D., & Torrie, J. H. (1980). *Principles and Procedures of Statistics* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Svihus, B., Uhlen, A. K., & Harstad, O. M. (2005). *Cereal starch nutritive value*. *Animal Feed Science and Technology*, 122, 303–320. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2005.02.025>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant physiology and development* (6th ed.). Sinauer Associates.
- Tidiane Sall, A., Chiari, T., Legesse, W., Seid-Ahmed, K., Ortiz, R., Van Ginkel, M., & Bassi, F. M. (2019). Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.): Origin, Cultivation and Potential Expansion in Sub-Saharan Africa. *Agronomy*, 9(5), 263. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050263>
- Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). *Global food demand*. *PNAS*, 108(50), 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
- Triboi, E., Martre, P., & Triboi-Blondel, A. M. (2003). *Protein composition in wheat*. *Journal of Experimental Botany*, 54(388), 1731–1742. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg183>
- Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press.
- Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W., & Rillig, M. C. (2010). *Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms*. *Plant and Soil*, 300, 9–20.
- Ye, L., Camps-Arbestain, M., Shen, Q., et al. (2020). *Biochar effects on crop yields*. *Soil Use and Management*, 36(1), 2–18. <https://doi.org/10.1111/sum.12546>